



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH  
TECHNOLOGIÍ**

**ÚSTAV MIKROELEKTRONIKY**

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION  
DEPARTMENT OF MICROELECTRONICS

## **ŘÍDICÍ ELEKTRONIKA PRO BIOHAZARD BOX**

CONTROL ELECTRONICS FOR BIOHAZARD BOX

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

MASTER'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

**Bc. LUKÁŠ PAVLAS**

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

**Ing. LADISLAV MACHÁŇ**

BRNO 2015



VYSOKÉ UČENÍ  
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky  
a komunikačních technologií

Ústav mikroelektroniky

# Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor  
**Mikroelektronika**

**Student:** Bc. Lukáš Pavlas

**ID:** 115251

**Ročník:** 2

**Akademický rok:** 2014/2015

## NÁZEV TÉMATU:

**Řídicí elektronika pro biohazard box**

## POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Cílem diplomové práce je realizovat funkční prototypové zařízení řídicí elektroniky laboratorního boxu s laminárním prouděním, který je určen pro práci s patologickým materiálem.

Výstupem diplomové práce je na základě navržené koncepce řídicí elektroniky (v závislosti na celkové koncepci laboratorního boxu) vytvořit požadovaný funkční rozšiřující modul. Cíl práce sestává z výběru součástek, vytvoření schéma zapojení, návrh DPS, osazení, oživení vč. naprogramování obslužného softwaru (firmwaru), který v sobě musí integrovat definovaný komunikační protokol.

Dále je požadováno průběžné ověřování funkčnosti (testování) navrženého řešení konstrukce rozšiřujícího modulu a také zařízení jako funkčního celku (řídicí elektronika, senzory, akční prvky).

Komunikační protokol musí respektovat požadavky na univerzální použití.

## DOPORUČENÁ LITERATURA:

Dle pokynů vedoucího práce

**Termín zadání:** 10.2.2015

**Termín odevzdání:** 28.5.2015

**Vedoucí práce:** Ing. Ladislav Macháň

**Konzultanti diplomové práce:**

**prof. Ing. Vladislav Musil, CSc.**

*Předseda oborové rady*

## UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

# Abstrakt

Předkládaná práce se zabývá návrhem řídicí elektroniky systému pro monitorování pracovních podmínek v laboratorním boxu. Je rozebrána problematika kategorizace laboratorních boxů s laminárním prouděním. Dále je provedena funkční specifikace celého zařízení na základě požadavků koncového zákazníka, na níž navazuje návrh koncepce možného řešení. Koncepce řešení pojednává o funkčním rozdělení řídicí elektroniky do dvou samostatných bloků označených jako Hlavní řídicí jednotka a Rozšiřující modul. Je proveden výběr vhodného řešení bloku Hlavní řídicí jednotky komerčně dostupným zařízením. Je navrženo řešení bloku Rozšiřujícího modulu včetně výběru vhodných komponent, realizace prototypové DPS a tvorby obslužného firmware. V závěru práce je provedena specifikace implementovaného komunikačního protokolu pro komunikaci mezi Hlavní řídicí jednotkou s Rozšiřujícím modulem.

# Abstract

This work deals with the design of the electronic driver system for working conditions monitoring in the laboratory box. The state of the art of the laboratory boxes with the laminar convection is presented. The functional specification is made based on final customer needs, then leads to design of the possible solution. The solution is divided into two independent blocks - Main driver unit and Add-on module. The Main driver unit solution is made upon commercially available solution. The Add-on module is then designed including selection of suitable components, PCB prototype and appropriate firmware. Finally the work presents specification of implemented communication protocol for joining both parts Main driver unit and Add-on module.

## Klíčová slova

laboratorní box, laminární proudění, rozhraní obsluhy zařízení, komunikační protokol

## Keywords

laboratory box, laminar flow, human-machine interface, communication protocol

## Bibliografická citace

PAVLAS, L. *Řídicí elektronika pro biohazard box*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2015. 66 s., 15 příl. Vedoucí diplomové práce Ing. Ladislav Macháň.

# Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto vysokoškolskou kvalifikační práci na téma **Řídicí elektronika pro biohazard box** vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne .....

.....

(podpis autora)

# Poděkování

Děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Ladislavovi Macháňovi za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové. Dále děkuji spolupracující firmě NT Engineering za poskytnutí prostor a vybavení pro účely diplomové práce.

V Brně dne .....

.....

(podpis autora)

# Obsah

<b>Seznam obrázků .....</b>	<b>8</b>
<b>Seznam tabulek.....</b>	<b>9</b>
<b>Úvod.....</b>	<b>10</b>
<b>1 Definice laboratorního boxu.....</b>	<b>11</b>
1.1 Monitorování fyzikálních veličin v boxu.....	12
1.1.1 Měření proudění .....	12
1.1.2 Měření absolutního a diferenčního tlaku .....	12
1.1.3 Měření teploty a relativní vlhkosti vzduchu .....	13
<b>2 Popis a specifikace vyvíjeného zařízení.....</b>	<b>14</b>
2.1 Postup při vývoji komplexnějšího zařízení.....	14
2.2 Funkční požadavky vyvíjeného zařízení.....	15
2.2.1 Rozhraní pro obsluhu zařízení.....	15
2.2.2 Sledování provozních parametrů zařízení .....	17
2.2.3 Akční a ostatní elektrotechnické prvky .....	19
<b>3 Koncepce řídicí elektroniky.....</b>	<b>22</b>
3.1 Zamítnuté způsoby realizace.....	22
3.2 Navržené řešení.....	22
3.3 Blok Hlavní řídicí jednotky .....	24
3.3.1 Volba Hlavní řídicí jednotky .....	24
3.3.2 Volba grafického displej s dotykovou vrstvou .....	26
3.3.3 Ethernetové rozhraní.....	28
3.3.4 Rozhraní pro externí paměťová média .....	28
3.4 Blok Rozšiřujícího modulu .....	28
3.4.1 DPS Rozšiřujícího modulu .....	29
3.4.2 Senzory .....	29
3.4.3 Akční prvky .....	31
3.4.4 Signalizační prvky .....	32
3.5 Návrh a realizace DPS Rozšiřujícího modulu .....	32
3.5.1 Volba a výběr komponent .....	33
3.5.2 Tvorba DPS Rozšiřujícího modulu .....	34

<b>4</b>	<b>Komunikační protokol .....</b>	<b>36</b>
4.1	Výběr sběrnice pro komunikaci .....	36
4.2	Specifikace protokolu .....	37
4.2.1	Příkazové skupiny .....	38
4.2.2	Symbolická jména adres příkazů .....	46
4.2.3	Formát datového rámce .....	48
4.2.4	Kontrola dat .....	49
4.3	Způsob komunikace mezi bloky řídicí elektroniky .....	54
4.3.1	Odesílání datového rámce .....	54
4.3.2	Příjem datového rámce .....	56
4.3.3	Příklad komunikace mezi bloky řídicí elektroniky .....	60
	<b>Závěr .....</b>	<b>62</b>
	<b>Seznam literatury .....</b>	<b>63</b>
	<b>Seznam zkratk .....</b>	<b>65</b>
	<b>Seznam příloh .....</b>	<b>66</b>

## Seznam obrázků

Obr. 1: Blokové schéma koncepce řešení.....	23
Obr. 2: Modul A20-OLinuXino-MICRO-4G, vrchní strana .....	26
Obr. 3: Grafický displej A13-LCD-TS, přední strana .....	27
Obr. 4: Senzor proudění D6F-W01A1 .....	29
Obr. 5: Senzor diferenciálního tlaku SM5852-001-D-3-LR .....	30
Obr. 6: Optická brána se štěrbinou KTIR0911S [6].....	31
Obr. 7: Radiální ventilátor R3G250-RE09-07.....	32
Obr. 8: DPS Rozšiřujícího modulu, neosazená strana bottom .....	34
Obr. 9: DPS Rozšiřujícího modulu, osazená strana top .....	35
Obr. 10: Význam bitů v adresovacím bytu protokolu .....	39
Obr. 11: Ukázka struktury symbolického jména adresy příkazu.....	46
Obr. 12: Sestavení symbolického jména, příklad 1 .....	47
Obr. 13: Sestavení symbolického jména, příklad 2 .....	47
Obr. 14: Sestavení symbolického jména, příklad 3 .....	48
Obr. 15: Sestavení symbolického jména, příklad 4 .....	48
Obr. 16: Pozice a označení bytů datového rámce.....	48
Obr. 17: Vývojový diagram odesílání datového rámce .....	55
Obr. 18: Vývojový diagram příjmu dat blokem Rozšiřujícího modulu .....	58
Obr. 19: Vývojový diagram příjmu dat blokem Hlavní řídicí jednotky .....	59



## Seznam tabulek

Tab. 1: Přehled vybraných parametrů kandidátů na Hlavní řídicí jednotku.....	25
Tab. 2: Vybrané parametry displeje A13-LCD-TS .....	27
Tab. 3: Přehled porovnávaných parametrů snímačů diferenciálního tlaku .....	30
Tab. 4: Vybrané parametry radiálního ventilátoru R3G250-RE09-07 .....	31
Tab. 5: Přehled definovaných příkazových podskupin .....	39
Tab. 6: Přehled adres příkazů podskupiny Nastavení.....	41
Tab. 7: Přehled adres příkazů podskupiny Dotazy I.....	42
Tab. 8: Přehled adres příkazů podskupiny Dotazy II .....	43
Tab. 9: Přehled adres příkazů podskupiny Odpovědi I .....	44
Tab. 10: Přehled adres příkazů podskupiny Odpovědi II .....	45
Tab. 11: Rozlišení směru komunikace u symbolický jmen adres příkazů .....	46
Tab. 12: Rozlišení typu příkazu symbolického jména adresy příkazu .....	46
Tab. 13: Příklad komunikace mezi bloky řídicí elektroniky, příkaz typu Nastavení .....	60
Tab. 14: Příklad komunikace mezi bloky řídicí elektroniky, příkaz typu Dotaz .....	60
Tab. 15: Příklad komunikace mezi bloky řídicí elektroniky, chyba CRC.....	61
Tab. 16: Příklad komunikace mezi bloky řídicí elektroniky, nedefinovaná adresa příkazu ....	61

# Úvod

Předkládaná diplomová práce byla zpracovávána v rámci projektu návrhu řídicí elektroniky systému pro monitorování pracovních podmínek v laboratorním boxu. Projekt se součástí vývojové činnosti na zařízení laboratorního typu označovaného jako laboratorní box s laminárním prouděním ve společnosti NT Engineering s.r.o. Tato společnost se zabývá návrhem specializované elektroniky a konstrukcí zařízení podle požadavků zákazníka.

V předkládané práci je nejprve rozebrána problematika laboratorních boxů, pracujících s laminárním prouděním v pracovním prostoru. Je uvedena jejich stručná definice, funkce, popis směru proudění. Je provedeno rozdělení do kategorií podle funkce laminárního proudění, vzhledem k ochraně operátora nebo vzorku. Jsou popsány a vysvětleny termíny, spojené s touto problematikou. Následuje definování fyzikálních veličin, které reprezentují provozní parametry spolu se specifikací způsobu jejich měření.

V další části práce jsou popsána obecná pravidla, která by měla být dodržována při návrhu komplexnějšího zařízení a která jsou a budou při dalším vývoji tohoto zařízení dodržována. Následuje specifikace funkčních požadavků podle s odkazem na požadavky zadavatele a představ vedení společnosti na možnou realizaci. Specifikace je rozdělena do tří kategorií podle funkce. V každé kategorii je nejprve blíže popsána její funkce a dále jdou podrobně rozebrány jednotlivé prvky v ní obsažené.

Koncepce navrhovaného řešení pojednává o rozdělení zařízení na jednotlivé dílčí funkční bloky a spolu s tím definuje jejich požadovanou funkci včetně parametrů ovlivňujících následný výběr komponent. V závěru kapitoly je uveden postup při výběru komponent, návrh a realizace DPS Rozšiřujícího modulu řídicí elektroniky.

Obsahem poslední kapitoly je popis způsobu komunikace dvou Hlavních bloků řídicí elektroniky (blok Hlavní řídicí jednotky a blok Rozšiřujícího modulu) spolu se specifikací komunikačního protokolu. V rámci specifikace komunikačního protokolu bude definován pojem datový rámec, formát datového rámce, způsob tvorby symbolických jmen definovaných adres příkazů. Dále bude vybrán způsob kontroly dat a implementovaný algoritmus jeho výpočtu.

# 1 Definice laboratorního boxu

Pod pojmem laboratorní box je chápán box s laminárním horizontálním nebo vertikálním prouděním, který je také někdy výrobcí označován jako laminární box, nebo anglickým výrazem „flowbox“. Jedná se o laboratorní zařízení, obsahující pracovní prostor, ve kterém je pomocí systému senzorických a akčních prvků udržováno horizontální nebo vertikální laminární proudění požadované hodnoty.

Výraz laminární proudění označuje způsob proudění tekutin (plyn, kapalina), při kterém se částice vzájemně nemísí, ale pohybují se vedle sebe a tzv. vrstevnice jsou rovnoběžné jak vzájemně tak i ke směru proudění. Taktéž je označováno jako vrstevnaté proudění.

Laminární proudění v laboratorním boxu nám tak zajišťuje v každém jeho místě stejný směr a rychlost proudění vzduchu bez turbulencí, díky kterému jsou zajištěny v celém prostoru pracovní plochy rovnoměrné podmínky.

Podle směru laminárního proudění můžeme laboratorní boxy rozdělit do čtyř kategorií, kdy každá z nich vyhovuje odlišnému typu práce.

- *Horizontální proudění s ochranou vzorků*
- *Horizontální proudění s ochranou operátora*
- *Vertikální proudění s ochranou vzorků*
- *Vertikální proudění s ochranou operátora i vzorků*

U laboratorních boxů pracujících s laminárním horizontálním nebo vertikálním prouděním s ochranou vzorků je prioritou čistota pracovního prostoru. Okolní vzduch se je nasáván ventilátorem v zadní části boxu pro horizontální proudění nebo v horní části boxu pro vertikální proudění, poté projde filtračním systémem a je vháněn do pracovního prostoru. Jelikož výfuk takových boxů je kolem rukou operátora, není možné tento typ používat pro práci s biologicky a chemicky nebezpečnými látkami ohrožující zdraví operátora. Tento typ se hodí spíše pro práci s materiály, které by se mohly buď poškodit prachovými částicemi ve vzduchu, nebo kontaminovat mikroorganismy ze vzduchu.

U laboratorních boxů pracujících s laminárním horizontálním prouděním s ochranou operátora je prioritou čistota vyfukovaného vzduchu. Okolní vzduch je nasáván kolem rukou operátora, tím je zajištěna jeho ochrana před biologicky a chemicky nebezpečnými látkami, se kterými se pracuje, nebo mohou vznikat při práci v boxu. Kontaminovaný vzduch je z pracovního prostoru odsáván filtračním systémem. Poté je vrácen zpět do okolí.

U laboratorních boxů pracujících s vertikálním prouděním s ochranou operátora i vzorků je prioritou čistota pracovního prostoru i ochrana operátora. Obě tyto podmínky jsou splněny díky uspořádání pracovního prostoru, ventilátoru zajišťujícího cirkulaci vzduchu v boxu a výfuku. Vzduch do pracovního prostoru vstupuje přes filtrační systém, čímž je zajištěna čistota pracovního prostoru a ochrana vzorků před okolními vlivy. Ochrana operátora je zajištěna nasáváním vzduchu kolem jeho rukou směrem k pracovnímu prostoru. Vzhledem k tomu, že v pracovním prostoru existuje vertikální laminární proudění shora dolů, je přisáván vzduch, zaprvé strhávám tímto prouděním, takže nekontaminuje vzorky

a zadruhé je odsávám otvory u vstupu do boxu pod pracovní prostor v důsledku tlakové ztráty ve vnitřním cirkulačním vzduchovém systému. Tlaková ztráta je způsobena rozdílem proudu vzduchu před a za ventilátorem. V prostoru za ventilátorem dochází k rozdělení proudu vzduchu na dvě části. Určitá část vchází do výfuku a posléze ven ze zařízení, zbylá část se vrací přes filtrační systém do pracovního prostoru. V důsledku rozdělení proudu vzduchu se do prostoru před ventilátorem vrátí menší proud vzduchu, než jím před tím prošel. Tím vzniká ona tlaková ztráta. Ta je při provozu zařízení právě vyrovnána množstvím přisávaného vzduchu kolem operátorových rukou do prostoru před ventilátorem. Množství přisávaného vzduchu koresponduje s množstvím vzduchu vycházejícího z výfuku. Vzduch vycházející z výfuku prochází přes filtrační systém, to zajišťuje ochranu operátorova okolí.

Filtračním systémem je označováno pořadí filtrů označovaných jako „pre-filtr“ a „HEPA“ filtr. Pre-filtr v podobě jednoduché kovové mřížky zabráňuje vniknutí objektů makroskopických rozměrů do systému, které by mohly poškodit HEPA filtr. HEPA filtr je speciální filtrační zařízení, které je schopno sterilizovat vzduch, který jím prochází. Vzduch je zbaven pevných částic a mikroorganismů. U těchto filtrů je deklarována účinnost filtrace až 99,97% pro částice o velikosti 300 nm. Tato velikost částic je pro funkci HEPA filtru kritická. Pro částice větší i menší je uváděná účinnost ještě vyšší. Původně byly vyvinuty v souvislosti zabránit kontaminaci vzduchu radioaktivními látkami. Dnes nacházejí HEPA filtry širší uplatnění, zejména pak v oblastech, medicíny, farmacie, laboratorních zařízení, atp.

## **1.1 Monitorování fyzikálních veličin v boxu**

Pro správný specifikovaný provoz zařízení je nutné vyhodnocovat stav charakteristických provozních fyzikálních veličin, které se v zařízení objevují a mají principiální funkční význam.

### **1.1.1 Měření proudění**

Z podstaty správné funkce laboratorního boxu s laminárním prouděním je nejdůležitějším parametrem v pracovním prostoru rychlost proudění vzduchu. Rychlost laminárního proudění v pracovním prostoru může do jisté míry ovlivňovat procesy, které se uvnitř odehrávají. Při vzniku volných radikálů nebo jiných reakčních produktů může jejich lokální koncentrace ovlivňovat další reakce nebo jejich rychlost. V tomto případě rychlost laminárního proudění můžeme chápat jako schopnost (rychlost) odstranění těchto nežádoucích produktů a obnovení výchozích podmínek.

### **1.1.2 Měření absolutního a diferenčního tlaku**

Velmi významným provozním parametrem je opotřebení filtračních systémů. K opotřebení, jejich postupnému znečištění (zanesení), dochází v důsledku zachytávání částic nečistot při průchodu vzduchu. Toto znečištění se projevuje jako snížení propustnosti vzduchu z prostoru před filtrem do prostoru za filtrem. Pokud v prostoru před filtrem bude stále stejný tlak, objem vzduchu, který projde filtrem za jednotku času, se zmenší, tzn. že i proud vzduchu v prostoru

za filtrem se zmenší. Pokud ale požadujeme, aby proudění za filtrem bylo stále konstantní, musíme sníženou propustnost (zvýšení odporu) pro proudění vzduchu kompenzovat zvýšením tlaku před filtrem. Toto zvýšení tlaku způsobí protlačení požadovaného objemu vzduchu a zachování požadovaného proudu vzduchu v prostoru za filtrem. Měřením diferenciálního tlaku v prostoru před a za filtrem můžeme sledovat tlakovou ztrátu resp. hodnotu rozdílu tlaků, který je potřebný pro průchod stále stejného objemu vzduchu filtrem a který přímo odpovídá znečištění filtru.

### **1.1.3 Měření teploty a relativní vlhkosti vzduchu**

Dalšími provozními parametry jsou teplota, relativní vlhkost, rychlost proudění vzduchu z výfuku, otáčky ventilátoru. Všechny zmíněné parametry mají spíše informativní (doplňující) charakter a nejsou nijak rozhodující pro funkčnost celého systému. Mohou ale podávat rozhodující informace, zda je vhodné za daných podmínek okolí zařízení používat. Například pokud je správná činnost snímačů podmíněna určitým intervalem hodnot relativní vlhkosti, teploty, diferenčního tlaku, náklonu atp. Dokonce můžeme získat představu, v jaké části převodní charakteristiky zvolených snímačů se pohybujeme. Nejvlivnějším parametrem z hlediska vlastností snímačů bývá vliv teploty. Kvalitnější senzory umí, díky integrované elektronice, kompenzovat vliv teploty. Kompenzace bývá opět jen v určitém teplotním intervalu uvnitř celkového intervalu provozních teplot.

## 2 Popis a specifikace vyvíjeného zařízení

Tento projekt je realizován jako vývojová činnost v rámci společnosti NT Engineering s.r.o. Jedná se o vývoj zařízení pro práci s biologickým materiálem. Tímto zařízením je laboratorní box s ochranou vzorků i operátora pomocí laminárního proudění uvnitř pracovního prostoru, označením jako BSC.

Požadovaným výstupem vývojové činnosti je plně funkční prototypové zařízení, které splňuje zadání a požadavky zákazníka. Výroba prototypu je důležitá pro účely testování funkce navržené koncepce řešení, konstrukce zařízení, ověření realizovatelnosti požadovaných funkcí a parametrů a v neposlední době také kalkulace a efektivita navržené konstrukce vzhledem k použitým komponentám.

### 2.1 Postup při vývoji komplexnějšího zařízení

Jedním z hlavních kritérií je celkové zadání (požadavky) zákazníka, potažmo zprostředkování funkčních požadavků od vedení společnosti, které byly spolu se zákazníkem specifikovány (navrženy). Ty se dají z hlediska charakteru rozdělit na dvě oblasti.

- *Mechanické konstrukční řešení:*
  - vzhled
  - rozměry
  - funkčnost zajišťující mechanické konstrukční prvky
- *Elektronické konstrukční řešení:*
  - způsob realizace rozhraní pro obsluhu zařízení (HMI)
  - vyspělost použitého systému obsluhy a kontroly provozu zařízení
  - komunikační a datové možnosti
  - informační a signalizační prostředky
  - způsob a požadavky na napájení zařízení
  - charakter provozního prostředí

Vývojová činnost na celém zařízení se dá vzhledem k výše uvedenému rozdělit stejně jako oblasti specifikace zadání, tedy na část vývoje mechanické konstrukce zařízení a část vývoje řídicí elektroniky.

Je zřejmé, že i když jsou obě oblasti velmi odlišné co do obsahu činnosti, nemohou být od sebe absolutně odděleny. Je nutné, aby vývojové činnosti na obou částech probíhala v kooperaci a současně bylo akceptováno zadání, vedoucí k realizaci požadované funkčnosti zařízení. Mechanická část musí být navržena vzhledem k možnostem a požadavkům akčních a snímacích prvků řídicí elektroniky a naopak řídicí elektronika musí respektovat mechanická omezení vycházející z konstrukce zařízení [10].

V tomto konkrétním případě je hlavní konstrukční řešení již navrženo. Dalším krokem je tedy návrh, realizace a implementace řídicí elektroniky. Předpokládá se, že budou především během implementace navrženého řešení realizace řídicí elektroniky navrhovány a následně implementovány úpravy mechanického provedení. Tyto úpravy mohou být vynuceny například velikostí, způsobem umístění nebo požadovanými provozními podmínkami jednotlivých ovládacích, kontrolních, informačních, snímacích a akčních prvků a komponent umístěných v zařízení [10].

Důraz při umísťování výše vyjmenovaných komponent by měl být kladen hlavně na doporučení výrobce dodávaných komponent pro zajištění jejich maximální životnosti a spolehlivosti. Umístění komponent by mělo respektovat požadavky na jejich jednoduchou a srozumitelnou čitelnost, snadné ovládání a zajištění jejich ochrany před poškozením při provozu a údržbě celého zařízení.

## 2.2 Funkční požadavky vyvíjeného zařízení

Před samotným specifikováním konkrétních žádaných funkčních požadavků na zařízení byl vzhledem k prvotním požadavkům zákazníka proveden průzkum trhu v oblasti vývoje, výroby a prodeje laboratorní techniky, konkrétně laboratorních boxů s laminárním prouděním. Tímto průzkumem byl získáno základní povědomí o možnostech konstrukčních řešeních, vybavení, technické vyspělosti a neposlední řadě i ceně již nabízených zařízení. Na základě těchto údajů lze poté se zákazníkem lépe komunikovat ohledně jeho představ specifikace funkčních požadavků nově vznikajícího zařízení a možnostech jejich realizace.

Neméně důležitým aspektem při specifikaci funkčních požadavků zařízení může být snaha o nalezení tzv. „díry na trhu“, tedy uvést na trh zařízení nabízející možnosti a funkce, kterými zatím konkurence nedisponuje.

U vyvíjeného zařízení s označením BSC můžeme specifikace funkčních požadavků rozdělit do 3 dílčí oblastí podle jejich funkce:

- *Rozhraní pro obsluhu zařízení*
- *Sledování provozních parametrů zařízení*
- *Akční a ostatní elektrotechnické prvky*

V rámci vývojové činnosti byly v součinnosti s vedením společnosti vytvořeny následující soubory specifikací funkčních požadavků pro jednotlivé oblasti. Oblasti jsou dále podrobněji rozebrány z hlediska dílčích funkcí, které musí zprostředkovávat.

### 2.2.1 Rozhraní pro obsluhu zařízení

#### Obecná specifikace:

Navrhněte řešení realizace obslužného rozhraní zařízení, též označovaného jako HMI, s důrazem na jednoduchost, funkčnost a přehlednost. Obslužné rozhraní musí umožňovat sledování aktuálních nebo zobrazení dlouhodobých hodnot provozních parametrů zařízení.

Musí nabízet 3 pracovní módy provozu zařízení. Musí umožňovat snadné nastavení požadovaného pracovního módu prostřednictvím uživatelské aplikace, která obsahuje minimálně 3 jazykové mutace (čeština, angličtina, němčina). Musí nabízet možnost ukládání (logování) provozních dat na externí paměťové médium (SD karta, USB flash paměť). Musí umožňovat aktualizace implementovaného softwaru popř. další doplňkové služby přes ethernetové rozhraní.

Při výběru komponent musí být respektován požadavek, že obsluha zařízení bude prováděna v pracovních (latexových) rukavicích.

#### **Specifikace komponent:**

- *Displej*
  - Vzhledem k požadavku přehlednosti zobrazovaných údajů uvažujte nad barevným grafickým displejem s rozměry úhlopříčky 5.6, 7 nebo 8 palců.
- *Dotyková vrstva umístěná přes displej nebo přímo displej vybavený dotykovou vrstvou.*
  - Vychází z požadavku nepoužívat mechanické tlačítka s modulovanou funkcí a také z požadavku jednoduché údržby (úklidu) vnější části zařízení.
- *Hlavní řídicí jednotka*
  - Navrhňte typ Hlavní řídicí jednotky s dostatečným výpočetním výkonem, velikostí paměti, dostatečným počtem výstupních a vstupních portů vzhledem k požadavkům obsluhy grafického displeje, obsluhy dotykové vrstvy, počtu snímačů reprezentující obecné vstupy a počtu akčních a obecných ovládaných elektrotechnických prvků reprezentující obecné výstupy. Dále musí umožňovat připojení externích paměťových medií (SD karta, USB flash paměť) a ethernetové rozhraní.

#### **Specifikace uživatelské aplikace:**

- *Pracovní módy*
  - Uživatelská aplikace musí umožňovat volbu jednoho ze tří rozdílných pracovních módů:
    - **Běžný provoz** – mód určený pro práci v boxu pro běžného uživatele
    - **Údržba** – mód určený pro čištění a údržbu pracovního prostoru pověřenou osobou
    - **Servis** – mód určený pouze pro servisní zásah autorizovanou osobou.
  - Pracovní mód Údržba a mód Servis je aktivován pouze při zadání vstupního kontrolního hesla. V režimu Servis je povolena vyšší poloha posuvného skla



u vstupu do pracovního prostoru i za provozu (specifikováno v kapitole 2.2.2 *Sledování provozních parametrů zařízení*).

- *Běžící systém*
  - Dle zvoleného typu Hlavní řídicí jednotky vhodně zvolte implementovaný systém, ve kterém poběží uživatelská aplikace. Běžící systém by měl být skrytý pro pracovní módy Běžný provoz a Údržba. Uživateli se zobrazí a zůstane přístupné pouze prostředí uživatelské aplikace bez možnosti získat přístup do prostředí běžícího systému, které je přístupné pouze v režimu Servis.
- *Uživatelská aplikace*
  - Aplikace zprostředkovávající interakci mezi zařízením a uživatelem. V závislosti na pozici ve své stromové struktuře vykresluje akční obslužná tlačítka na displeji. Umožňuje nastavování pracovního módu spolu s limity hodnot provozních parametrů. Dále umožňuje zobrazování aktuálních hodnot provozních parametrů nebo vyvolání záznamů starších hodnot provozních parametrů v podobě přehledových tabulek nebo grafů. Umožňuje také změnu přístupových hesel pověřených osob, volbu používaného externího paměťového média, formát ukládaných dat atp.

## 2.2.2 Sledování provozních parametrů zařízení

### Obecná specifikace:

Stav zařízení v provozu je určen hodnotami provozních parametrů. Tyto parametry lze rozdělit na kritické provozní parametry, které přímo ovlivňují funkci zařízení a doplňující (informativní) provozní parametry, které podávají doplňující informace.

Jako kritické provozní parametry považujeme polohu výsuvného skla (vstup do pracovního prostoru), rychlost laminárního proudění uvnitř pracovního prostoru, objem vzduchu odcházejícího z vnitřního cirkulačního oběhu výfukem, které přesně odpovídá objemu vzduchu přisávaného podél rukou operátora v místě vstupu do pracovního prostoru a tlakovou ztrátu v prostorech nad a pod HEPA filtrem způsobenou jeho znečištěním.

Tlaková ztráta je vyhodnocována pro oba HEPA filtry, tedy pro filtr před pracovním prostorem i pro filtr ve výfuku ze zařízení.

Jako doplňující provozní parametry považujeme teplotu vzduchu v pracovním prostoru, teplotu vzduchu okolí (měli by se shodovat), relativní vlhkost vzduchu v pracovním prostoru, relativní vlhkost vzduchu okolí (mohou být různé), atmosférický tlak okolí. Jako dalším doplňujícími informacemi jsou aktuální počet otáček ventilátoru a počet provozních hodin.

Zaměřte se na volbu rozsahů, ve kterých se měřené veličiny pohybují. Prozkoumejte provedení snímačů (popř. jen čidel) pro zvolené rozsahy měřených veličin. Ověřte jaký vliv má umístění snímače v jeho pracovním prostoru.

## Specifikace komponent:

- *Senzory*

- Vyberte senzory, které mají nejlépe shodné napájecí napětí a stejný rozsah výstupního napětí, pokud mají analogový výstup.
- Snímače polohy, které slouží k určení polohy vysunutí předního skla u vstupu do pracovního prostoru, musí být umístěny tak, aby identifikovaly 3 pozice spodní hrany skla od dosedací plochy (dno pracovního prostoru). Snímané pozice spodní hrany posuvného skla jsou definovány hodnotami: 0 mm – poloha zavřeno (může probíhat dekontaminace UV zářením); 160 – 250 mm – interval poloh pro práci v boxu; >250 mm – poloha pro údržbu vnitřního pracovního prostoru; Snímače polohy musejí mít absolutní charakter, aby bylo možné v jakémkoli okamžiku určit polohu (resp. interval poloh), ve které se nachází spodní hrana skla. Tato informace nesmí být dokonce pozměnitelná ani výpadkem napájecího napětí.
- Pro senzor měření proudění, který slouží pro účel měření hodnoty rychlosti laminárního proudění v pracovním prostoru, zvolte pracovní rozsah 0,1 – 0,4 m/s.
- Pro senzory měření diferenčního tlaku, které slouží pro účel vyhodnocení znečištění HEPA filtrů v důsledku tlakové ztráty mezi prostory ze kterých do HEPA filtrů vzduch vstupuje a prostory do kterých z HEPA filtrů vzduch vystupuje, zvolte pracovní rozsah 0 – 500 Pa.
- Pro senzor měření absolutního tlaku, který slouží pro účely měření atmosférického tlaku okolí, jako doplňkové informace např. pro zápis podmínek v době prováděné práce nebo experimentu, zvolte pracovní rozsah odpovídající atmosférickému tlaku (1013,25 hPa).
- Pro senzor měření teploty, který slouží pro účely měření teploty okolí, jako doplňkové informace např. pro zápis podmínek v době prováděné práce nebo experimentu, zvolte pracovní rozsah odpovídající běžné pokojové teplotě (20 °C +/- 10°C).
- Pro senzory měření relativní vlhkosti, které slouží pro účely měření relativní vlhkosti uvnitř pracovního prostoru a relativní vlhkosti okolí, jako doplňkové informace např. pro zápis podmínek v době prováděné práce nebo experimentu, zvolte pracovní rozsah 0 – 100%.

- *Hlavní řídicí jednotka*

- Senzory musí být vybírány tak, aby jejich výstupní signály mohly být zpracovávány Hlavní řídicí jednotkou. Výstupní signály mohou mít formu digitální informace (komunikace po sběrnici) nebo formu analogové veličiny. Pokud není rozsah výstupního analogového signálu přímo kompatibilní s analogovými vstupy Hlavní řídicí jednotky, je nutné tyto signály nejprve vhodným způsobem upravit (typicky některým zapojením s operačním

zesilovačem). Hlavní řídicí jednotka musí disponovat dostatečným počtem analogových vstupů, tedy kanálů A/D převodníku, aby mohla zpracovávat signály od všech použitých senzorů s analogovým výstupem.

### **2.2.3 Akční a ostatní elektrotechnické prvky**

#### **Obecná specifikace:**

Zařízení by mělo obsahovat akční a další doplňující prvky elektrotechnického a elektromechanického charakteru, které jednak podmiňují, ale zároveň doplňují požadovanou celkovou funkčnost zařízení s důrazem na bezpečnost provozu a ochranu pracovníků.

Jedním z nejdůležitějších prvků celého zařízení na napájecí zdroj, který musí dodávat napájecí napětí pro všechny součásti implementované elektroniky.

Základním akčním prvkem celého systému je ventilátor, který podmiňuje nucenou cirkulaci vzduchu ve vnitřním cirkulačním systému. Strana, kterou nasává vzduch je připojen do prostoru, který je vyústěný až pod dno vnitřního pracovního prostoru, strana, která vzduch vyfukuje je připojen do prostoru, kde se vzduch rozděluje na dvě části. Jedna část prochází HEPA filtrem zpět do pracovního prostoru, zbylá část odchází přes samostatný HEPA filtr prostřednictvím výfuku ven ze zařízení.

Řízení otáček ventilátoru je jedním ze dvou způsobů, jak měnit intenzitu laminárního proudění v pracovním prostoru. Pokud zvýšíme otáčky ventilátoru, zvýší se lineární proudění v pracovním prostoru, ale zvýší se i hodnoty objemu vyfukovaného a přisávaného vzduchu, protože poměr, jakým se vzduch ve vnitřním cirkulačním systému dělí je zachován nastavením škrticí klapky výfuku.

Druhý způsob jak ovládat intenzitu laminárního proudění v pracovním prostoru je pomocí nastavení škrticí klapky na výfuku vzduchu. Je ovšem nutné sledování a zachování minimální hodnoty vyfukovaného objemu vzduchu, protože ten odpovídá objemu přisávaného vzduchu kolem rukou operátora a tím k jeho ochraně.

Samozřejmostí je osvětlení pracovního prostoru zářivkovými trubicemi. Implementována je i UV zářivková trubice pro dekontaminaci pracovního prostoru, která je aktivní pouze při úplném uzavření vstupu. Zařízení by mělo být vybaveno optickou a akustickou indikací stávajícího provozního stavu nebo jeho změny. Zařízení bude na čelní straně vybaveno logem zadavatelské společnosti. Změnou barvy loga (podle barevného modelu RGB) bude indikován provozní stav zařízení - optická signalizace.

## Specifikace komponent:

- *Napájecí zdroj*
  - Zvolený napájecí zdroj musí poskytovat napájecí napětí požadovaných úrovní pro všechny části řídicí elektroniky. Pro účely tohoto zařízení se jako vhodné řešení jeví použití vyrobeného průmyslového spínaného zdroje s výstupními napěťovými větvemi +5 V a +12 V, který se použije jako komponenta.
- *Ventilátor*
  - Použijte ventilátor s takovým typem elektromotoru, nebo předřazené elektroniky, aby bylo umožněno jednoduché řízení jeho otáček buď pomocí analogové hodnoty řídicího napětí, nebo pomocí pulzně šířkové modulace (PWM). Rozmezí řízení otáček ventilátoru 10 - 100%.
- *Škrticí klapka na výfuku*
  - V souladu s konstrukčním provedením výfuku a škrticí klapky na výfuku použijte k nastavování její polohy servomotor, v případě nutnosti i převodovou skříň. Navržené řešení by mělo umožňovat jednoduché nastavení požadované polohy a možnost zjištění polohy v případě kdy dojde k výpadku a obnovení napájecího napětí. Experimentálně určete maximální hodnotu uzavření škrticí klapka, kdy je ještě objem přisávaného vzduchu postačující o zajištění ochrany operátora.
- *Běžná zářivková a UV zářivková trubice*
  - Vzhledem ke snížení spotřeby elektrické energie celého zařízení by měli být použity pro napájení zářivkových trubec elektronické předřadníky, díky kterým není generována téměř žádná jalová složka proudu (oproti klasické topologii s tlumivkou). Pro napájení Běžné zářivkové trubice sloužící k osvětlení pracovního prostoru, by měl být navíc použitý elektronický předřadník, umožňovat řízení výkonu tedy intenzity osvětlení a to buď pomocí analogové hodnoty řídicího napětí, nebo pomocí pulzně šířkové modulace (PWM).
- *Akustická indikace*
  - Pro akustickou indikaci by měla být použita siréna, která je vhodná vzhledem ke svým provozním parametrům pro provoz v uzavřené místnosti (hlasitost, akustický tlak). Akustická indikace upozorňuje na nežádoucí stav, ve kterém se zařízení ocitlo vlivem hodnot provozních parametrů mimo povolený interval a je aktivní během celého trvání tohoto nežádoucího stavu. Musí být jednoznačně nezaměnitelná s jiným zvukem, který by mohl při práci v laboratoři vzniknout.

- *Osvětlení loga*
  - K osvětlení loga zadavatelské společnosti bude použito RGB LED pásku. Pro řízení jasu jednotlivých barevných LED bude použito pulzně šířkové modulace (PWM). Tím můžeme teoreticky dosáhnout počtu možných barevných kombinací odpovídající trojnásobku rozlišení PWM kanálu.
- *Hlavní řídicí jednotka*
  - Akční a ostatní elektrotechnické prvky musí být vybírány tak, aby signály, kterými jsou řízeny, odpovídaly možnostem výstupních signálů Hlavní řídicí jednotky. A to jak v počtu, tak v napěťové úrovni. Nejjednodušším způsobem, jak řídit akční a ostatní elektrotechnické prvky, je použití pulzně šířkové modulace. PWM signál má tu výhodu, že informace je přenášena pouze šířkou impulsu nosné frekvence, není tedy přímo závislá na napěťové úrovni a dá se poměrně snadno přes optočleny upravit na požadovanou napěťovou úroveň včetně galvanického oddělení. Z tohoto hlediska je tedy hlavním požadavkem dostatečný počet kanálů PWM.

## 3 Koncepce řídicí elektroniky

Na základě dříve uvedených specifikací funkčních požadavků, které byly vytvořeny v rámci příprav vývojové činnosti, byla provedena analýza s aplikací stěžejních požadavků na jednotlivé části zařízení. Výsledkem analýzy je návrh možného řešení s použitím konkrétních komponent a prvků. Součástí výsledků analýzy je celková myšlenková koncepce zařízení doplněná o blokové schéma navrženého řešení.

### 3.1 Zamítnuté způsoby realizace

Nejprve byly ze specifikace funkčních požadavků vybrány nepodstatnější požadavky na vlastnosti a funkci zařízení. Poté bylo analyzováno, jsou-li vybrané požadavky realizovatelné v požadované funkčnosti, pokud by se řešení navrhovalo od výběru součástek a vytvoření desek plošných spojů (DPS). Toto řešení bylo vzhledem ke komplexnosti návrhu a časové náročnosti odladění funkčnosti vybraných funkčních požadavků zamítnuto.

Dalším směrem teda byla myšlenka, že se tyto velmi složité bloky budou realizovat pomocí modulů, které jsou již prodávány jako specializované moduly plnící třeba jen jednu požadovanou funkci. Bylo tedy nutné definovat alespoň v hrubých obrysech, jaké funkční požadavky by mohly být podle nabídky na trhu realizovány již hotovými bloky. S tím také souviselo určit, jaké parametry jsou pro výběr určitého druhu modulu rozhodující.

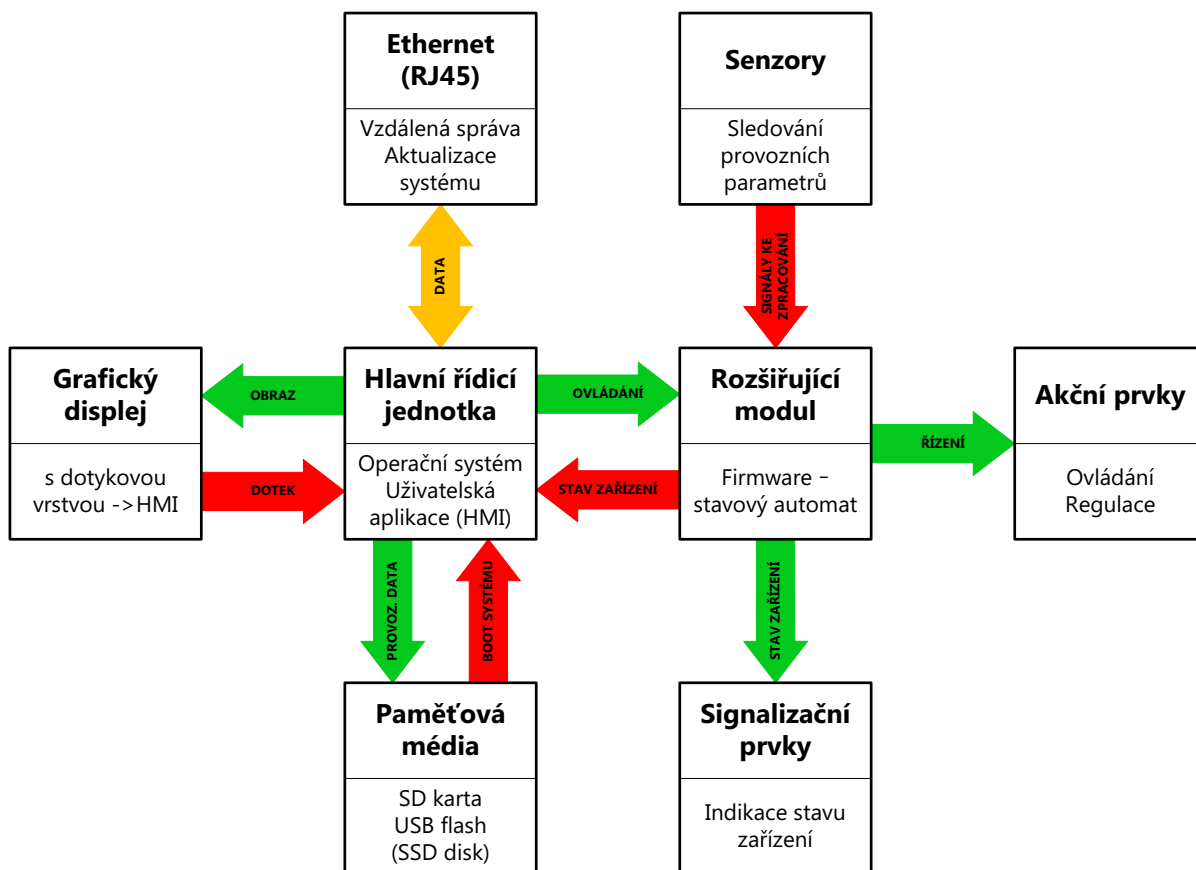
Z těchto požadavků nakonec vzešli tři hlavní požadavky v tomto pořadí důležitosti:

- *Grafický displej definovaný velikostí úhlopříčky, počtem zobrazovacích bodů a způsobem připojení (typ sběrnice) k nadřazené jednotce spolu s dotykovou vrstvou.*
- *Procesorová karta definovaná vlastnostmi osazeného procesoru (rychlost jádra, velikost paměti, počet vyvedených vstupních/výstupních portů z toho počet kanálů A/D převodníku a počet kanálů PWM).*
- *Ethernetový modul definovaný způsobem připojení (typ sběrnice) k nadřazené jednotce.*

Řešení uvedené v předchozích odstavcích se ukázalo jako neefektivní jak z hlediska finančního což je zřejmé hned, protože je zapotřebí koupit 3 samostatné DPS které je nutné posléze vhodně propojit, tak z hlediska funkčního, protože při výběru jednotlivých komponent bylo naráženo na překážky ve vzájemné nekompatibilitě.

### 3.2 Navržené řešení

Z obou kroků způsobu směřování možné realizace a výběru komponent popsaných v předchozí kapitole nakonec vyplynuly celkem jasné požadavky, z kolik modulů se bude skládat navržené řešení a jaké parametry budou rozhodující pro jejich výběr. Na základě těchto úvah byla vytvořena koncepce postupu celkového řešení zařízení s odkazem na co nejjednodušší návrh a nejefektivnější funkci. Náhled na koncepci řešení nabízí blokové schéma obr. 1.



**Obr. 1:** Blokové schéma koncepce řešení

Blokové schéma (obr. 1) ukazuje rozdělení navrhovaného řešení řídicí elektroniky zařízení na dílčí funkční bloky. Každý z uvedených bloků plní své specifické funkce.

Celková koncepce řídicí elektroniky je pak významově rozdělena na dva hlavní funkční bloky, které obsahují jednotlivé dílčí bloky:

- *Blok Hlavní řídicí jednotky*
- *Blok Rozšiřujícího modulu*

Komunikace mezi blokem Hlavní řídicí jednotky a blokem Rozšiřujícího modulu je realizována pomocí navrženého komunikačního protokolu po sběrnici USB.

Specifikace protokolu je na straně bloku Rozšiřující modulu součástí firmwaru, na straně bloku Hlavní řídicí jednotky je obsažena v uživatelské aplikaci.

Tato koncepce je zvolena proto, aby volba modulu realizujícího Hlavní řídicí jednotu byla volnější. Po spuštění operačního systému (v Hlavní řídicí jednotce), je spuštěna uživatelská aplikace, která zprostředkovává jednak interakci mezi uživatele a zařízením a současně komunikuje po USB sběrnici s blokem Rozšiřujícího modulu.

### 3.3 Blok Hlavní řídicí jednotky

Nejdůležitější prvek celého zařízení. Spojuje všechny dílčí bloky dohromady a zajišťuje tak celkovou požadovanou funkčnost zařízení. Spolu s blokem Rozšiřujícího modulu tvoří „srdce a mozek“ celého zařízení a určují tak významnou měrou celkovou funkčnost zařízení.

Blok Hlavní řídicí jednotky se dle požadované funkčnosti skládá z těchto částí:

- *Hlavní řídicí jednotka:*
- *Grafický displej s dotykovou vrstvou*
- *Ethernetové rozhraní*
- *Rozhraní pro externí paměťová média*

#### 3.3.1 Volba Hlavní řídicí jednotky

Jak již bylo uvedeno v předešlých kapitolách, nejdůležitějším prvkem řídicí elektroniky navrženého řešení je Hlavní řídicí jednotka, která mimo jiné plní funkci propojovacího článku mezi ostatními jednotlivými bloky. Jak bude uvedeno dále, některá nalezená řešení, mezi kterými probíhal výběr, již obsahovala i další funkční moduly, které byly v blokovém schématu navrhovaného řešení řídicí elektroniky uvedeny zvlášť, viz obr. 1.

Při výběru Hlavní řídicí jednotky bylo přihlíženo na několik rozhodujících kritérií:

- *Výpočetní výkon (rychlost a typ jádra osazeného procesoru)*
- *Typ a velikost pamětí, se kterým procesor pracuje*
- *Typ a počet portů (USB, VGA, HDMI, sériová komunikace)*
- *Možnost použití SD karty*
- *Jaké operační systémy lze implementovat (Linux, Windows CE, Android)*
- *Způsob připojení a typy možných připojených grafických displejů (typ rozhraní, velikost a rozlišení displeje)*
- *Počet obecných výstupně/vstupních portů (na hardwarové úrovni)*
- *Počet a typ standardních komunikačních sběrnic (SPI, I<sup>2</sup>C také označovanou TWI)*
- *Ethernetové rozhraní*
- *Rozsah napájecího napětí*
- *Konstrukční řešení (fyzické rozměry, rozložení komponent a konektorů)*
- *Cena*
- *Dostupnost a podpora u českého prodejce*

Zařízení, která byla vybírána pro funkci Hlavní řídicí jednotky, jsou označována anglickými výrazy jako *Computer-On-Module* (COM) nebo *System-On-Module* (SOM). Do češtiny by se tyto výrazy mohli volně překládat jako *počítačový*, nebo *systémový modul* anebo *modul obsahující počítač* nebo *systém* (systémové řešení). Patří do skupiny zařízení souhrnně označovaných anglickým výrazem jako *Single-Board-Computer* (SBC), v češtině by se tento výraz dal chápat jako *počítače realizované na jedné desce plošných spojů*, nebo *jednodílný počítač*. Zařízení SBC jsou tedy charakterizovány tím, že nabízejí na určité úrovni



funkčnost běžného počítače (omezení použitým hardwarem) a celý systém je realizovaný je jedné desce plošných spojů (DPS, PCB) [9].

Deska plošných spojů tedy obsahuje procesor, paměti, rozšiřující funkční bloky, konektory, rozhraní pro připojení externích komponent atp. Ve srovnání s PC plní funkci základní desky, ale bez možnosti použité komponenty měnit.

Použijeme-li takovéto řešení pro konstrukci zařízení (elektronické, elektromechanické, mechanické aj.), je použité řešení označováno anglickým výrazem *embedded system*, s českým ekvivalentem *vestavěný systém*. Tento vestavěný systém má v rámci zařízení jasně definovanou funkci a napomáhá ke komplexnosti celého systému a zlepšuje tak celkovou funkčnost konstruovaného zařízení [7].

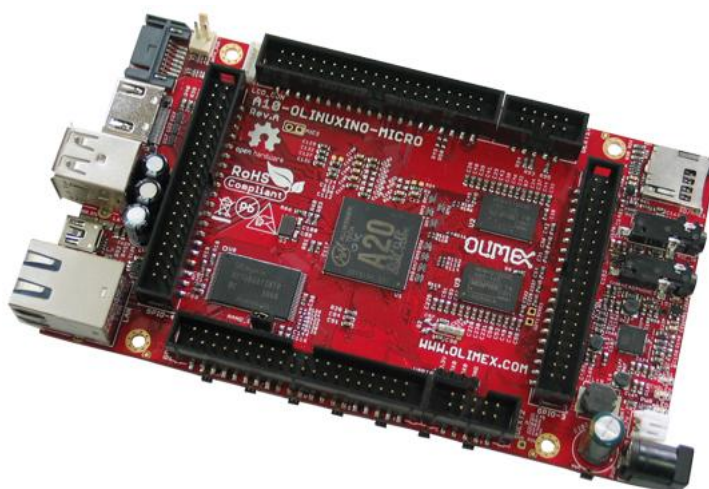
Z množství modulů nabízených na trhu byly ke konečné volbě vybrány 3 produkty. Vlastnosti, kterými disponují, ukazuje přehledová tabulka tab. 1.

**Tab. 1:** Přehled vybraných parametrů kandidátů na Hlavní řídicí jednotku [14],[10],[4]

<b>název</b>	<b>Colibri T20 + Iris Carrier Board</b>	<b>A20-OLinuXino- MICRO-4G</b>	<b>MarS Board</b>
<b>výrobce</b>	Toradex	Olimex	Embest
<b>procesor</b>	Tegra 2 dual-core Cortex-A9 Mpcore	Cortex-A7 dual core	ARM Cortex™-A9
<b>RAM paměť</b>	512MB DDR2	1 GB DDR3	4 x 256 MB DDR3
<b>Flash paměť</b>	1 GB	4 GB	2 MB, 4 GB eMMC
<b>EEPROM paměť</b>	ne	2 KB pro MAC adresu	ne
<b>USB</b>	1×USB, 1×USB-OTG	2×USB, 1×USB-OTG	2×USB, 1×USB-OTG
<b>HDMI</b>	DVI-I	ano (Full HD)	ano (Full HD)
<b>VGA</b>	ne	ne	ne
<b>SD karta</b>	1×microSD	1×SD/MMC, 1×microSD	1×microSD
<b>operační systém</b>	WindowsCE, Linux	Linux, Android	Linux, Android
<b>displej</b>	TFT LCD 4.3, 7	TFT LCD 4.3, 7, 10.1	TFT LCD 7
<b>UART</b>	1×	3×	4×
<b>SPI</b>	1×	2×	1×
<b>I<sup>2</sup>C</b>	1×	2×	2×
<b>ethernet</b>	10/100Mb RJ45	10/100Mb RJ45	10/100/1000Mb RJ45
<b>napájení</b>	6 – 27 V	6 - 16 V	5 V
<b>rozměry</b>	72 × 100 mm	143 × 83 mm	66 x 102 mm
<b>cena</b>	cca 4200,- Kč	cca 2070,- Kč	cca 4600,- Kč

Mezi hlavní kritéria pro konečnou volbu modulu patřila možnost použití grafického displeje požadované velikosti a rozlišení. Toto srovnání probíhalo vždy s produkty nabízenými samotnými výrobci vybíraných modulů a to z důvodů zajištění kompatibility s implementovanými hardwarovými a softwarovými prostředky (ovladači), které jsou optimalizovány na konkrétní displeje.

Dále také rozsah použitelného vstupního napájecího napětí. Protože některé moduly nabízejí možnost širšího rozptylu hodnot vstupního napájecího napětí, je výhodnější jejich volba. V tomto případě můžeme ušetřit napěťovou větev napájecího zdroje pro celé zařízení, protože vybrané moduly obsahují svůj vlastní stabilizovaný zdroj napětí, který zajišťuje požadované napětí pro svůj provoz.



**Obr. 2:** Modul A20-OLinuXino-MICRO-4G, vrchní strana

Pro realizaci Hlavní řídicí jednotky byl vybrán modul, který nabízí společnost Olimex pod označením *A20-OLinuXino-MICRO-4G*.

### 3.3.2 Volba grafického displej s dotykovou vrstvou

Spolu s uživatelskou aplikací tvoří uživatelské rozhraní obsluhy zařízení označované také jako HMI. Uživatelská aplikace zobrazuje podle zvoleného režimu data spolu s vykreslováním akčních (obslužných) tlačítek. Díky dotykové vrstvě je systémem detekováno, jaké ze zobrazených tlačítek bylo použito (stisknuto).

Grafický displej lze označovat jako výstup uživatelského rozhraní, který nabízí požadované informace a ovládací prvky. Dotykovou vrstvu lze označovat jako vstup uživatelského rozhraní, na který zařízení definovaným způsobem reaguje.

Při jeho výběru je tedy velmi důležité zvolit dostačující velikost a rozlišení, aby byly zobrazované informace dobře čitelné a aby rozmístění vykreslovaných akčních tlačítek nebylo zmatečné.

Dotyková je umístěna před samotným grafickým displejem a zprostředkovává interakci mezi obsluhou a zařízením. Neměla by svými optickými vlastnostmi nijak zásadně ovlivňovat čitelnost displeje za ní. Z důvodu potřeby obsluhovat zařízení v latexových popř. jiných ochranných nebo pracovních rukavicích je nutné, aby dotyková vrstva, kterou je zařízení (displej) vybavena, byla rezistivního charakteru.

Všechny tyto požadavky byly při výběru displeje akceptovány. Jelikož i rozměry a způsob připojení displeje hráli roli při výběru modulu realizujícího Hlavní řídicí jednotku, byl pak displej zpětně vybírán z produktů, které výrobce nabízí a které jsou přímo podporovány zvoleným modulem.

Z produktů nabízených společnostmi Olimex, jako kompatibilních s vybraným modulem, byl vybrán grafický displej disponující dotykovou vrstvou rezistivního charakteru pod označením *A13-LCD7-TS*, viz obr. 3. Přehledová tabulka tab. 2 shrnuje parametry vybraného displeje.



**Obr. 3:** Grafický displej A13-LCD-TS, přední strana

**Tab. 2:** Vybrané parametry displeje A13-LCD-TS [11]

<b>úhlopříčka</b>	7 palců
<b>velikost panelu</b>	162,5 × 96,6 mm
<b>aktivní oblast</b>	154,1 × 85,9 mm
<b>rozlišení</b>	800 × 480
<b>velikost bodu</b>	0,064 × 0,179 mm
<b>uspořádání bodů</b>	RGB proužky
<b>řízený prvek</b>	TFT aktivní matice
<b>počet zobraz. barev</b>	16,7 milionů

### 3.3.3 Ethernetové rozhraní

Zajišťuje konektivitu zařízení do sítě internet. Díky této funkci se nabízí možnost vzdálené správy zařízení. Vzdálenou správu můžeme rozdělit na dva režimy. Prvním je přístup uživatele a možnost pozorování aktuálních provozních dat nebo získání (stažení) dlouhodobých provozních dat uložených na paměťových médiích v zařízení. Druhým je vzdálený servisní zásah výrobce.

Další možností, která se nabízí s využitím ethernetového modulu, je aktualizace všech softwarových prostředků. Aktualizace mohou být podmíněny zlepšením ovládání, změnou a vylepšením funkcí, žádostí zákazníka atp.

Modul realizující Hlavní řídicí jednotku byl vybírán s ohledem na to, aby jeho součástí byl ethernetový řadič a konektor RJ45 (ethernetové rozhraní).

### 3.3.4 Rozhraní pro externí paměťová média

Tento blok má zprostředkovávat možnost snadného připojení externích paměťových médií bez nutnosti, zabývat se zajištěním správného připojení a obsluhy na elementární hardwarové úrovni.

Svou funkcí umožňuje zápis nebo čtení dat na/z paměťových médií (SD karty, paměti typu flash).

Modul realizující Hlavní řídicí jednotku byl vybírán s ohledem na to, aby k němu bylo možné bez problému tato paměťová média připojovat.

## 3.4 Blok Rozšiřujícího modulu

Pracuje v nejtěsnějším kontaktu s Hlavní řídicí jednotkou. Zajišťuje funkčnost zařízení na nižší (hardwarové) úrovni v závislosti na hodnotě konfiguračních dat předaných z vyšší úrovně (od Hlavní řídicí jednotky).

Hlavní výhodou je, že pracuje paralelně s Hlavní řídicí jednotkou. Hlavní řídicí jednotka na základě zásahu obsluhy vytvoří konfigurační data. Tato data jsou předána Rozšiřujícímu modulu, který v závislosti na jejich obsahu adekvátně zareaguje. Rozšiřující modul také zajišťuje zpracování signálů ze senzorů použitých v zařízení. Hodnoty provozních parametrů a stav zařízení předává vždy na dotaz Hlavní řídicí jednotce.

Blok Rozšiřujícího modulu se dle požadované funkčnosti skládá z těchto částí:

- *DPS Rozšiřujícího modulu*
- *Senzory*
- *Akční prvky*
- *Signalizační prvky*

### 3.4.1 DPS Rozšiřujícího modulu

Základem DPS Rozšiřující modulu je mikrokontrolér s implementovaným firmwarem v podobě stavového automatu. Dále obsahuje obvody pro úpravy zpracovávaných signálů od senzorů a také prvky pro galvanické oddělení digitální a výkonové části (akční prvky).

Jedním z hlavních úkolů Rozšiřujícího modulu je cyklické zpracovávání hodnot výstupních signálů senzorů. Podle typu výstupního signálu senzorů je zpracování prováděno buď pomocí A/D převodníků nebo prostřednictvím komunikace po sběrnici. Získaná data jsou na dotaz předávána Hlavní řídicí jednotce.

Další funkcí Rozšiřujícího modulu je generování řídicích signálů požadovaných průběhů a velikostí pro akční prvky. Podle typu vstupních řídicích signálů jednotlivých akčních prvků jsou řízeny pomocí signálů pulzně šířkové modulace (PWM) přímo, nebo pokud jsou řízeny analogovou hodnotou, nepřímo pomocí převodníku f/U jakožto určité formy D/A převodníku s nepřímým převodem.

Obě tyto funkce jsou ovlivněny poslední získanou hodnotou konfiguračních dat a pracují ve stejném režimu a se stejnými vstupními hodnotami až do té doby, dokud mikrokontrolér neobdrží nová konfigurační data.

### 3.4.2 Senzory

Senzory slouží ke sledování provozních parametrů, jakými jsou hodnota rychlosti laminárního proudění v pracovním prostoru, tlaková ztráta způsobená znečištěním HEPA filtrů a polohy výsuvného skla u vstupu do pracovního prostoru.

Jako senzor pro snímání rychlosti laminárního proudění v pracovním prostoru byl zvolen senzor od společnosti OMRON s označením D6F-W01A1, viz obr. 4. Tento senzor dokáže měřit proudění vzduchu v rozsahu od 0 do 1 m/s. Rozsah senzoru byl volen s ohledem na hodnoty proudění vzduchu, kterých bude v pracovním prostoru dosahováno (do 0,5 m/s).



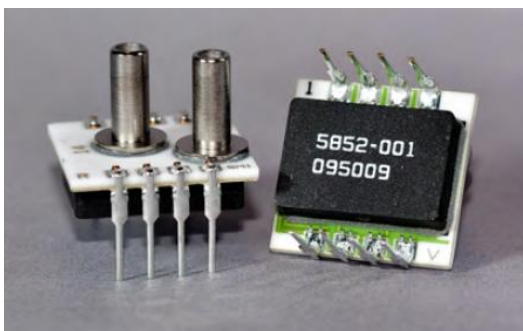
**Obr. 4:** Senzor proudění D6F-W01A1

Pro vyhodnocování tlakové ztráty v prostorech před a za HEPA filtry je použit senzor pro snímání diferenciálního tlaku. Rozsah měřených hodnot diferenciálního tlaku se pohybuje teoreticky od 0 Pa až po předpokládaných 500 Pa. Je nutno dodat, že snímače pro takto nízké hodnoty nejsou zcela běžné a proto jich na trhu není mnoho. Při hledání senzoru vyhovující zadaným požadavkům byly nakonec vybrány 3 produkty, jejichž parametry jsou porovnávány v tabulce tab. 3.

**Tab. 3:** Přehled porovnávaných parametrů snímačů diferenciálního tlaku [15],[14],[13]

název	SM5852-001-D-3-LR	SM5470-001-D-B	D6F-PH
výrobce	Silicon Microstructures	Silicon Microstructures	Omron
provozní tlak	0 – 1 kPa	0 – 1 kPa	-500 – 500 Pa
výstupní signál	Analog / digital (I <sup>2</sup> C)	analog	digital (I <sup>2</sup> C)
napájecí napětí	5 V	5 V	2,3 – 3,6 V
typ pouzdra	DIL8	SOIC16	THT

Pro otestování citlivostí jednotlivých snímačů diferenciálního tlaku (změna výstupního napětí v závislosti na změně působících tlaků) byla vytvořena zkušební testovací DPS. Byly otestovány 3 vybrané snímače uvedené v tabulce tab. 3. S ohledem na výsledky testování byl pro realizaci DPS Rozšiřujícího modulu vybrán snímač od společnosti Silicon Microstructures s označením SM5852-001-D-3-LR.



**Obr. 5:** Senzor diferenciálního tlaku SM5852-001-D-3-LR

Pro měření aktuálního atmosférického tlaku byl vybrán senzor od společnosti Freescale Semiconductor s označením MPXH6101A6.

Pro určení polohy výsuvného skla bylo vybráno řešení s optickými branami. Pro toto řešení byla kritická tloušťka použitého skla (velikost štěrbin brány). Výhodou této konstrukce je v tom, že není třeba na sledovaný objekt instalovat zrcátko nebo odrazku, jako v případě, kdy je použito řešení s vysílačem a přijímačem na jedné straně, většinou v jednom pouzdře. Instalace reflexního prvku je dosti komplikovaná, protože musí docházet k odrazu paprsku definovaným směrem. S použitím optické brány se štěrbinou tento problém odpadá, je nutné jen zajistit neprostupnost vysílaného paprsku v okamžiku, kdy je sledovaný objekt ve štěrbině. V zařízení je použito optické brány od společnosti Kingbright s označením KTIR0911S (obr. 6) s hloubkou štěrbin 13 mm a šířkou 15 mm [8].



**Obr. 6:** Optická brána se štěrbinou KTIR0911S [8]

### 3.4.3 Akční prvky

Akční prvky realizují reakci řídicí elektroniky na podněty nebo stavy, které to vyžadují. Těmi to stavy mohou být buď změny provozních parametrů, nebo zásah obsluhy do chodu zařízení v provozu.

Hlavním z provozních parametrů je hodnota laminární proudění v pracovním prostoru, která je přímo ovlivnitelná řízením otáček ventilátorů použitého pro nucenou cirkulaci vzduchu ve vnitřním cirkulačním systému. Ventilátor použitý v této konstrukci je od společnosti *ebm-papst* pod označením *R3G250-RE09-07*, viz obr. 7. Mezi jeho hlavní výhody patří možnost přímého řízení otáček prostřednictvím signálu PWM nebo analogově napětím v rozsahu 1-10 V. Další vybrané parametry jsou uvedeny v přehledové tabulce tab. 4.

**Tab. 4:** Vybrané parametry radiálního ventilátoru R3G250-RE09-07 [4]

<b>provozní napětí</b>	200 – 240 V
<b>frekvence napětí</b>	50/60 Hz
<b>max. počet otáček</b>	2510 / min
<b>max. odebíraný proud</b>	1,4 A
<b>rozsah prac. teplot</b>	-25 – 60 °C
<b>počet lopatek</b>	7
<b>řízení otáček</b>	0 – 10 VDC / PWM signál
<b>stupeň krytí</b>	IP 54



**Obr. 7:** Radiální ventilátor R3G250-RE09-07

Pro ovládání osvětlení v pracovním prostoru byl zvolen elektronický předřadník od společnosti OSRAM s označením HF 2X36/230 DIM. Vybraný typ disponuje funkcí řízení jasu připojených fluorescenčních trubíc při svícení pomocí řídicího analogového signálu v rozsahu 1-10 V.

#### **3.4.4 Signalizační prvky**

Slouží k jasné a srozumitelné signalizace stavu zařízení. Oznamují, zda je zařízení v provozu a pokud ano, tak v jakém provozním stavu se nachází. V našem případě jsou použity dva druhy signalizačních prvků:

- *Optické*
- *Akustické*

Funkci optického signalizačního prvku zastává LED pásek s RGB čipy osvětlující logo zadávající firmy. Každá ze tří barev je řízena samostatně pomocí pulzně šířkové modulace (PWM). Možná nastavená intenzita každé barvy je odstupňovaná po 10% v rozsahu 0-100%.

Akustickým signalizačním prvkem je piezokeramický akustický měnič (sirénka). Neobsahuje obvod pro generování střídavého signálu, a proto musí být buzena střídavým signálem. To umožňuje prostřednictvím změny frekvence signálu šířkově pulzní modulace měnit výšku tónu pro rozlišení oznamovaných událostí (stavů).

### **3.5 Návrh a realizace DPS Rozšiřujícího modulu**

Při volbě součástek pro konstrukci DPS Rozšiřujícího modulu bylo postupováno dle požadavků na funkčnost modulu, rozsahu měřených fyzikálních veličin, způsobu vyhodnocování stavů zařízení a způsobu ovládání akčních prvků.



### 3.5.1 Volba a výběr komponent

Další neméně důležitou volbou byl výběr řídicího mikrokontroléru jako hlavního akčního prvku DSP Rozšiřujícího modulu. Při jeho výběru musel být brán zřetel na povahu signálů ze senzorů, potřebný počet vstupně výstupních bran, potřebný počet specializovaných vstupů (analogovo-digitální převodník) a výstupů (počet PWM).

Všem těmto požadavkům spolehlivě vyhověl mikrokontrolér od společnosti Atmel s označením AT90USB647[1]. Mimo dostatečný počet obecných vstupně výstupních bran disponuje pro naše účely dostatečným počtem kanálů analogovo-digitálního převodníku i dostatečným počtem výstupů PWM. Další vlastností, které rozhodla o jeho výběru je skutečnost, že přímo v sobě obsahuje funkci USB řadiče.

Z důvodů větší univerzálnosti prototypové DPS je vedle klasického USB mini B konektoru možné použít pro připojení kabelu USB svorkovnici. Z důvodů ESD ochrany mikrokontroléru byly použity ochranné diody ve formě integrovaného obvodu s označením IP4220CZ6.

Řízení spínacích cívek použitých relé neprobíhá přímo vstupně výstupními piny, ale pomocí tranzistorového pole (driver) s vnitřním zapojením tranzistorů označovaným jako darlingtonovo zapojení. Byl vybrán obvod s označením ULN2003AD.

Pro generování a uchování systémového času v rámci DPS Rozšiřujícího modulu byl použit obvod reálného času (RTC) s označením DS1307+. Tento obvod pro svou funkci vyžaduje hodinový krystalový oscilátor s frekvencí 32,768 kHz a 3 V lithiovou baterii pro funkci obvodu při výpadku napájení.

Pro spínání výkonových zátěží (ventilátory, předřadníky) byla použita relé s označením G5LA-1-E 12VDC od společnosti OMRON. Výkon spínacích cívek 360 mW (30 mA / 12 V), maximální spínaný proud 10 A při střídavém napětí 250 V.

DPS Rozšiřujícího modulu je napájena z hlavního zdroje 3 A / 12 V stejně jako modul Hlavní řídicí jednotky. Toto napětí je zvoleno z důvodů napájení spínacích cívek relé a také napájení operačních zesilovačů pracujících v režimu digitálně-analogových převodníků.

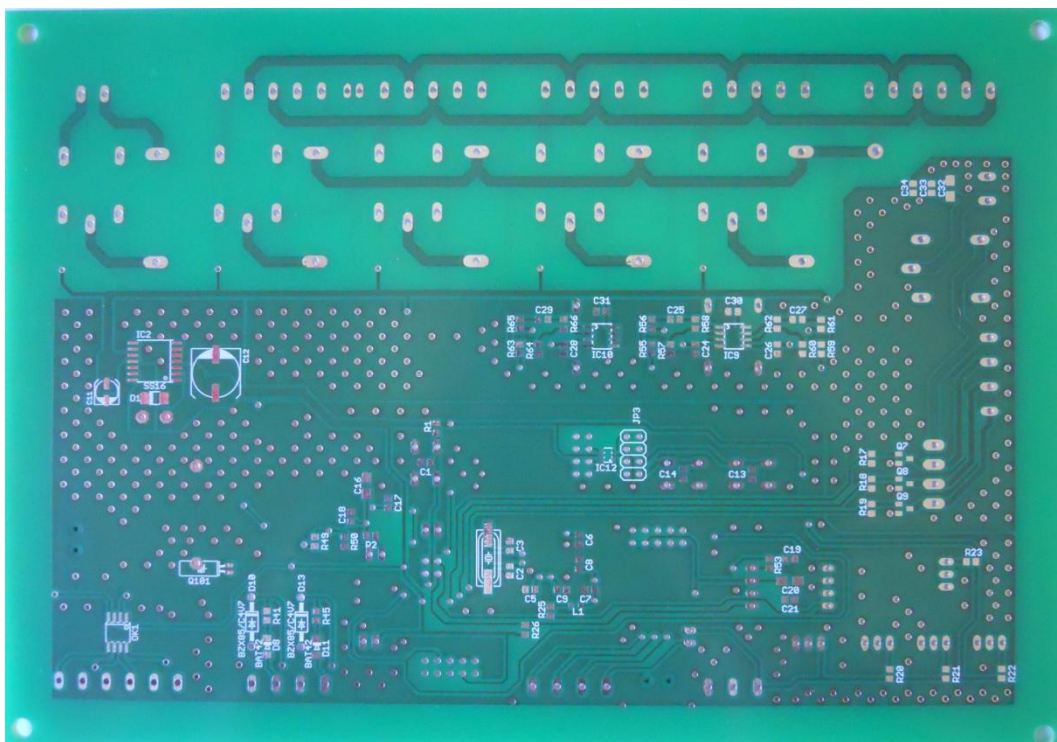
Pro potřeby integrovaných obvodů a snímačů je na DPS Rozšiřujícího modulu umístěn malý spínaný zdroj s pevným výstupním napětím 5 V realizovaný s pomocí integrovaného obvodu s označením LM2574M-5.0.

Pro generování řídicích analogových signálů v rozsahu 1-10 V pro řídicí elektroniku motorů ventilátorů a elektronického předřadníku pro osvětlení pracovního prostoru bylo použito zapojení s operačním zesilovačem s označením LM358D ve funkci digitálně-analogového převodníku. Jedná se o zapojení filtru druhého řádu, označované jako sallen-key. Na výstup operačních zesilovačů je navíc připojena zenerova dioda se zenerovým napětím 10 V, aby řídicí analogové napětí nepřesáhlo hodnotu 10 V.

### 3.5.2 Tvorba DPS Rozšiřujícího modulu

Schéma a layout DPS Rozšiřujícího modulu byly vytvořeny v prostředí návrhového systému plošných spojů Eagle. Kompletní schéma elektrického zapojení Rozšiřujícího modulu, obrazce plošných spojů vrstev top a bottom, servisní potisky vrstev top a bottom a osazovací plánek jsou k nahlédnutí na konci práce v přílohách.

DPS byla vyrobena společností Gatema se sídlem v Boskovicích. Jedná se oboustrannou dvouvrstvou DPS (pouze vrstvy top a bottom) s prokovy, povrchovou úpravou HAL. Základní materiál FR4 tloušťky 1,5 mm s rozměry 220 x 155 mm. Na obrázku obr. 8 je k vidění neosazená strana bottom, obrázek obr. 9 ukazuje stranu top po osazení součástkami.



**Obr. 8:** DPS Rozšiřujícího modulu, neosazená strana bottom

Na obrázku obr. 8 je zřetelně vidět oddělení výkonové vysokonapěťové části. Střídavé napětí 230 V (L) je od vstupní svorkovnice společně se nulovým (N) a ochranným vodičem (PE) rozvedeno ke svorkovnicím pro hlavní spínací zdroj (3A / 12 V), dále pro motory ventilátorů a elektronické předřadníky pro fluorescenční a UV zářivky.

Na obrázcích obr. 8 a obr. 9 je patrná hustota prokovů zemnicích ploch z důvodů co největší eliminace nepříznivých vlivů šumu. Analogová a digitální zem je spojena v jednom místě, podle uspořádání DPS co nejbližše zdrojové sorce, z důvodů eliminace vlivu protékajícího proudu v analogové části na činnost digitální části.

DPS Rozšiřujícího modulu byla osazena ručně v prostorách společnosti NT Engineerig na pracovišti ručního pájení pomocí mikropáčky.



## 4 Komunikační protokol

Z koncepce návrhu řídicí elektroniky vyplývá, že se řídicí elektronika jako celek skládá ze dvou hlavních funkčních bloků označených jako blok Hlavní řídicí jednotky a blok Rozšiřujícího modulu, viz obr. 1 blokové schéma.

Toto rozdělení vychází s konkrétních požadavků na funkci celého zařízení. Vyšší úroveň funkčnosti zajišťuje blok Hlavní řídicí jednotky (ovládání grafického displeje, práce s externími paměťovými médii). Nižší úroveň funkčnosti zajišťuje blok Rozšiřujícího modulu (generování ovládacích signálů, ovládání akčních prvků, úprava signálů). Např. vytvářet v systémech *Computer-On-Module* pulzně šířkovou modulaci PWM pomocí cyklického přepínání výstupu mezi „0“ a „1“ programově je neefektivní. V opačném případě např. vytvářet v mikrokontroléru řadič pro čtení a zápis dat z SD karty, ethernetový řadič nebo řadič pro ovládání grafického displeje aj. by bylo velmi komplikované.

Z výše uvedených skutečností vychází poznatek, že i když oba bloky řídicí elektroniky mohou nezávisle na sobě pracovat paralelně vedle sebe (většinu času tak pracují), existuje potřeba, aby oba takto oddělené (definované) bloky mezi sebou komunikovaly a vyměňovaly si informace.

Zmíněná situace popisuje komunikaci mezi dvěma body, v našem případě mezi dvěma bloky řídicí elektroniky. Obecně tedy komunikaci někdo řídí. Pokud v tomto případě použijeme terminologii master a slave, chápeme blok Hlavní řídicí jednotky master a blok Rozšiřujícího modulu jako slave. Z toho označení také vychází vztahy mezi oběma bloky v rámci komunikačního protokolu.

Blok Hlavní řídicí jednotky v roli master tedy řídí veškerou komunikaci probíhající po zvoleném typu sběrnice. Blok Rozšiřujícího modulu pracuje striktně v roli slave a tedy sám od sebe nikdy komunikaci nezahajuje, provede se pouze adekvátní reakce na obsah datových rámců přijatých od bloku Hlavní řídicí jednotky.

### 4.1 Výběr sběrnice pro komunikaci

Výběr typu zvolené sběrnice pro komunikaci mezi blokem Hlavní řídicí jednotky a blokem Rozšiřujícího modulu byl prováděn vzhledem k maximální univerzálnosti navrženého řešení s možností budoucí náhrady libovolného ze dvou bloků řídicí elektroniky. Zvolený typ sběrnice je chápán jako fyzická vrstva komunikačního protokolu.

Na základě výše uvedeného byla pouze z pohledu bloku Hlavní řídicí jednotky zvolena čistě sběrnice USB. Na straně bloku Rozšiřujícího modulu byla totiž zvolena hybridní varianta s převodníkem UART $\leftrightarrow$ USB (označení FT232R [6]).

Výhodou této varianty obecně je, že napomáhá rychlejšímu vývoji zařízení s požadavkem konektivity zařízení prostřednictvím sběrnice USB. Je ale nutné podotknout, že tato zařízení nelze plně považovat za USB zařízení v tom pravém slova smyslu, protože

nepřinášení pro systém, ke kterému byly připojeny, rozšířenou funkcionalitu v porovnání např. s herním joystickem, externí zvukovou kartou atp.

Zařízení používající pro komunikaci po sběrnici USB převodník UART⇔USB by mohlo být ze své podstaty zařazeno do třídy USB zařízení označené jako *Communication Device Class*, ale sám výrobce čipu použitého převodníku UART⇔USB FT232R společnost FTDI na svých webových stránkách [6] uvádí, že zařízení je definováno jako *Vendor Class* tedy jako vlastní třída výrobce.

Po připojení zařízení s převodníkem UART⇔USB FT232RL společnosti FTDI k PC se systémem Windows XP a vyšší je buď uživatel vyzván k instalaci ovladače virtuálního portu, nebo dojde k jeho instalaci automaticky, což je uživateli systémem oznámeno. V systému je vytvořen virtuální sériový port. Fyzická podoba vzniklého sériového portu je tvořena převodníkem UART⇔USB na straně UART sběrnice. Komunikace probíhá de facto ve formátu UART, ale fyzicky a částečně i softwarově je zprostředkovávána standardem USB sběrnice. Tedy formát dat probíhajících po sběrnici, řízení toku, kontrola došlých dat aj.

Při volbě sběrnice se nabízela i možnost použití pouze čisté UART sběrnice, ale při výběru modulu realizujícího blok Hlavní řídicí jednotky, byly objeveny moduly, které již hardwarově UART nepodporovaly, tudíž by mohla být omezena možnost jejich snadné náhrady. To byl jeden z klíčových faktorů ovlivňující konečnou volbu typu sběrnice.

Výhody vyplývající z volby sběrnice USB jsou mnohé. Drtivá většina dnešních zařízení disponuje rozhraním USB kvůli její maximální univerzálnosti. V případě tohoto zařízení to tedy přináší možnost výměny jednoho ze dvou bloků řídicí elektroniky v případě, že zvolený blok už svými parametry nevyhovuje aktuálním požadavkům. Podmínkou pro zachování funkčnosti v původním rozsahu je, aby byla v nahrazovaném bloku implementována specifikace používaného komunikačního protokolu.

## 4.2 Specifikace protokolu

Specifikace protokolu je na straně bloku Rozšiřujícího modulu přímo součástí firmwaru nahraného v řídicím mikrokontroléru. Implementovaný firmware specifikuje chování zařízení ve zvolených pracovních režimech společně s reakcemi na mimořádné události, které mohou nastat během provozu. Z podstaty se jedná o stavový automat. Podobně jako na vníklé mimořádné události a jiné, reaguje i na přijatá data.

Specifikace protokolu na straně bloku Hlavní řídicí jednotky je součástí uživatelské aplikace, které zprostředkovává v součinnosti s grafickým displejem s dotykovou vrstvou rozhraní obsluhy zařízení (HMI). Při tomto tvrzení je vycházeno z předpokladu, že v rámci modulu realizující Hlavní řídicí jednotku je nainstalován a provozován operační systém. Uživatelské aplikace je pak spuštěna v tomto prostředí operačního systému.

Specifikace protokolu na obou stranách tedy obsahuje kompletní seznam adres příkazů. Každá strana ovšem používá odlišné hodnoty adres příkazů i v případě, že se jedná o stejnou instrukci nebo stavovou informaci ve smyslu dotazu od bloku Hlavní řídicí jednotky a

odpovědi od bloku Rozšiřujícího modulu. Tím je zaručena jednoznačná rozlišitelnost obsahu a směru komunikace.

Dalším parametrem specifikace protokolu je formát dat, tedy velikost a význam obsahu dat odeslaných současně v rámci jedné zprávy. S tímto souvisí pojem datový rámec, který specifikuje velikost této zprávy spolu s významem jednotlivých bytů zprávy (datového rámce). Význam bytů předurčuje jejich pozice v datovém rámci.

Součástí specifikace protokolu je také implementace mechanismu kontroly správnosti (platnosti) přijatých dat. V tomto případě se nejedná o šifrování dat z důvodů ochrany jejich obsahu, ale z důvodů kontroly jejich integrity, tedy jestli nedošlo při jejich přenosu k poškození anebo jestli odesílající blok řídicí elektroniky při jejich vytvoření neudělal chybu.

### 4.2.1 Příkazové skupiny

Pod pojmem příkazové skupiny si lze představit názvem označený seznam příkazů, které vykonávají podobnou funkci. Název seznamu odráží charakter vykonávaných funkcí.

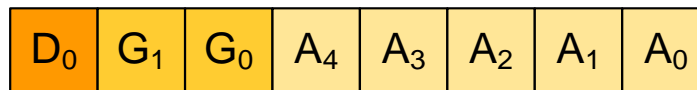
Pro identifikaci příkazové skupiny a adresaci konkrétního příkazu v rámci skupiny je použito osmibitové slovo, tedy byte. Tato velikost tedy umožňuje celkem odlišit až  $2^8$  (256) různých adres příkazů v rozsahu hodnot 0 až 255, což je pro potřeby navrhované specifikace protokolu dostačující.

Z hlediska rozdělení řídicí elektroniky na blok Hlaví řídicí jednotky a blok Rozšiřujícího modulu lze obdobně provést první rozdělení příkazových skupin na dvě nejvyšší skupiny podle směru komunikace. Pro směr od bloku Hlavní řídicí jednotky je rezervováno 128 adres příkazů v rozsahu hodnot 0 až 127. Pro směr od bloku Rozšiřujícího modulu je rezervováno shodně 128 adres příkazů a to v rozsahu hodnot 128 až 255. Toto rozdělení se projeví jako hodnota nejvýznamnějšího bitu (MSB) v bytu adresace příkazu. Na obrázku obr. 10 je znázorněna struktura adresovacího bytu. Pozice nejvýznamnějšího bitu, určující z jakého bloku řídicí elektroniky je příkaz odeslán, je označena jako  $D_0$  (direction).

Vzniklé dvě hlavní skupiny adres rozlišující směr komunikace se dále každá z nich dělí na čtyři podskupiny. Ke způsobu rozlišení těchto čtyř podskupin jsou použity další dva bity s nižším významem než MSB. Na obrázku obr. 10 je znázorněna struktura adresovacího bytu. Pozice bitů, rozlišujících dílčí podskupiny hlavních příkazových skupin, jsou označeny jako  $G_1$  a  $G_0$  (group).

Pro identifikaci směru komunikace a rozlišení dílčí podskupiny byly dohromady využity tři z osmi bitů adresovacího bytu. Zbylých pět bitů adresovacího bytu je použito k určení adresy konkrétního příkazu v rámci vybrané podskupiny. Každá dílčí příkazová podskupina tedy disponuje  $2^5$  (32) adresami. Na obrázku obr. 10 je znázorněna struktura adresovacího bytu. Pozice bitů, definujících adresu příkazu v rámci vybrané dílčí příkazové podskupiny, jsou označeny jako  $A_4$ ,  $A_3$ ,  $A_2$ ,  $A_1$  a  $A_0$  (address).





**Obr. 10:** Význam bitů v adresovacím bytu protokolu

V rámci specifikace protokolu je celkem definováno osm příkazových podskupin. V aktuální implementované specifikaci protokolu je použito prozatím postačujících pět příkazových podskupin, viz tab. 5. Každá příkazová podskupina má vyhrazený prostor pro adresaci příkazů v rozsahu třiceti dvou adres, přičemž nulová adresa se nikdy nevyužívá. Také plný rozsah zbývajících třiceti jedné adresy není nikdy využit. Jsou ponechány volné adresy jako rezerva z důvodů možnosti pozdějšího rozšíření o další příkazy.

**Tab. 5:** Přehled definovaných příkazových podskupin

$D_0$	$G_1$	$G_0$	Rozsah adres	Název podskupiny
0	0 0		0x00 – 0x1F	Rezerva I (Reserve I)
0	0 1		0x20 – 0x3F	Nastavení (Settings)
0	1 0		0x40 – 0x5F	Dotazy I (Requests I)
0	1 1		0x60 – 0x7F	Dotazy II (Requests II)
1	0 0		0x80 – 0x9F	Odpovědi I (Replies I)
1	0 1		0xA0 – 0xBF	Odpovědi II (Replies II)
1	1 0		0xC0 – 0xDF	Rezerva II (Reserve II)
1	1 1		0xE0 – 0xFF	Rezerva III (Reserve III)

První obsazená příkazová podskupina s označením Nastavení (Settings) spadá do skupiny příkazů odesílaných blokem Hlavní řídicí jednotky. To znamená, že nejvýznamnější bit adresovacího bytu bude mít hodnotu logické nuly ( $D_0 = 0$ ). Podskupina je charakterizována hexadecimálními hodnotami adres v rozsahu 0x20 až 0x3F. Tyto adresy jsou odesílány pouze blokem Hlavní řídicí jednotky a blok Rozšiřujícího modulu je přijme, ověří, vyhodnotí a zpracuje. Podrobnější popis mechanismu příjmu a zpracování datového rámce je uveden v kapitole 4.3 *Způsob komunikace mezi bloky řídicí elektroniky*. Zpracováním adresy příkazu v rámci příkazové skupiny Nastavení se rozumí vykonání změny nastavení zvoleného parametru dle přehledu uvedeného v tabulce tab. 6.

Druhá obsazená příkazová podskupina s označením Dotazy I (Requests I) spadá stejně jako příkazová podskupina Nastavení (Settings) do skupiny příkazů odesílaných blokem Hlavní řídicí jednotky. Obdobně pak nejvýznamnější bit adresovacího bytu bude mít hodnotu logické nuly ( $D_0 = 0$ ). Podskupina je charakterizována hexadecimálními hodnotami adres v rozsahu 0x40 až 0x5F. Adresy z tohoto rozsahu jsou odesílány pouze blokem Hlavní řídicí jednotky a blok Rozšiřujícího modulu je přijme, ověří, vyhodnotí a zpracuje. Zpracováním adresy příkazu v rámci příkazové skupiny Dotazy I se rozumí získání hodnoty konkrétní systémové proměnné dle přehledu uvedeného v tabulce tab. 7. Poté co je hodnota získána následuje sestavení datového rámce odpovědi a jeho odeslání. Podobnější popis mechanismu

příjmu, zpracování, sestavení a odeslání datového rámce je uveden v kapitole 4.3 *Způsob komunikace mezi bloky řídicí elektroniky*.

Třetí obsazená příkazová podskupina s označením Dotazy II (Requests II) spadá obdobně jako předcházející výše uvedené příkazové podskupiny do skupiny příkazů odesílaných blokem Hlavní řídicí jednotky ( $D_0 = 0$ ). Jedná se o doplnění příkazové podskupiny s označením Dotazy I. Platí pro ni stejné podmínky a způsoby příjmu, zpracování, sestavení a odeslání datového rámce jako pro příkazovou podskupinu Dotazy I. Jediným rozdílem je vymezený rozsah hexadecimálních hodnot adres v rozmezí 0x60 až 0x7F. Zpracováním adresy příkazu v rámci příkazové skupiny Dotazy II se rozumí získání hodnoty konkrétní systémové proměnné dle přehledu uvedeného v tabulce tab. 8.

Čtvrtá obsazená příkazová podskupina s označením Odpovědi I (Replies I) spadá do skupiny příkazů odesílaných blokem Rozšiřujícího modulu. S tím přímo souvisí, že nejvýznamnější bit adresovacího bytu bude mít hodnotu logické jedničky ( $D_0 = 1$ ). Podskupina je charakterizována hexadecimálními hodnotami adres v rozsahu 0x80 až 0x9F. Tyto adresy jsou odesílány pouze blokem Rozšiřujícího modulu a posléze zpracovány blokem Hlavní řídicí jednotky. Hodnota adresy odpovědi určuje, pro který příkaz dotazu je sestavován datový rámec s odpovědí. Současně adresa odpovědi určuje význam dat obsažených v odesílaném datovém rámci. Přehled adres uvedený v tabulce tab. 9 představuje seznam odpovědí bloku Rozšiřujícího modulu na příkazy bloku Hlavní řídicí jednotky z příkazové podskupiny Dotazy I. Podobnější popis mechanismu příjmu, zpracování, sestavení a odeslání datového rámce je uveden v kapitole 4.3 *Způsob komunikace mezi bloky řídicí elektroniky*.

Pátá obsazená příkazová podskupina s označením Odpovědi II (Replies II) spadá stejně jako příkazová podskupina Odpovědi I (Replies I) do skupiny příkazů odesílaných blokem Rozšiřujícího modulu ( $D_0 = 1$ ). Jedná se o doplnění příkazové podskupiny s označením Odpovědi I. Platí pro ni stejné podmínky a způsoby příjmu, zpracování, sestavení a odeslání datového rámce jako pro příkazovou podskupinu Odpovědi I. Jediným rozdílem je vymezený rozsah hexadecimálních hodnot adres v rozmezí 0xA0 až 0xBF. Seznam adres v tabulce tab. 10 reprezentuje odpovědi pro příkazy z podskupiny Dotazy II rozšířené o stavové odpovědi, informující blok Hlavní řídicí jednotky o přijetí datového rámce blokem Rozšiřujícího modulu a v případě výskytu chyby přijatých dat informující o povaze detekované chyby.



**Tab. 6:** Přehled adres příkazů podskupiny Nastavení

Symbol. jméno	Pod- skupina	příkaz	HEX	Popis systémové proměnné
	001	0 0000	0x20	
MSRMCN	001	0 0001	0x21	aktivace servisního módu
MMAMCN	001	0 0010	0x22	aktivace módu údržby
MNOMCN	001	0 0011	0x23	aktivace běžného provozního módu
MSTM CN	001	0 0100	0x24	aktivace pohotovostního módu
MDEMCN	001	0 0101	0x25	aktivace módu dekontaminace prac. prostoru
	001	0 0110	0x26	
	001	0 0111	0x27	
MFN1CN	001	0 1000	0x28	nastavení výkonu ventilátoru 1 (0 – 100%, krok 10%)
MFN2CN	001	0 1001	0x29	nastavení výkonu ventilátoru 2 (0 – 100%, krok 10%)
MTUBCN	001	0 1010	0x2A	nastavení výkonu osvětlení prac. prostoru (0 – 100%, krok 10%)
MUVMCN	001	0 1011	0x2B	zapnutí/vypnutí relé UV
MRGBCN	001	0 1100	0x2C	ovládání relé - připojení napájení RGB LED pásku
MREDCN	001	0 1101	0x2D	nastavení intenzity červené barvy RGB LED pásku (0-255)
MGRNCN	001	0 1110	0x2E	nastavení intenzity zelené barvy RGB LED pásku (0-255)
MBLUCN	001	0 1111	0x2F	nastavení intenzity modré barvy RGB LED pásku (0-255)
MRELCN	001	1 0000	0x30	ovládání pomocného relé
MBUZCN	001	1 0001	0x31	zapnutí/vypnutí signalizační sirény
MUPOCN	001	1 0010	0x32	ovládání výkonových komplementárních tranzistorů
	001	1 0011	0x33	
MRT0CN	001	1 0100	0x34	hodnoty pro registr RTC na adrese 0x00 (sekundy)
MRT1CN	001	1 0101	0x35	hodnoty pro registr RTC na adrese 0x01 (minuty)
MRT2CN	001	1 0110	0x36	hodnoty pro registr RTC na adrese 0x02 (hodiny; 12/24 formát)
MRT3CN	001	1 0111	0x37	hodnoty pro registr RTC na adrese 0x03 (dny v týdnu)
MRT4CN	001	1 1000	0x38	hodnoty pro registr RTC na adrese 0x04 (datum - dny)
MRT5CN	001	1 1001	0x39	hodnoty pro registr RTC na adrese 0x05 (datum - měsíce)
MRT6CN	001	1 1010	0x3A	hodnoty pro registr RTC na adrese 0x06 (datum - roky; 00-99)
MRT7CN	001	1 1011	0x3B	hodnoty pro registr RTC na adrese 0x07 (registr nastavení)
	001	1 1100	0x3C	
MTFLCN	001	1 1101	0x3D	změna provozní doby filtrů
MTUVCN	001	1 1110	0x3E	změna provozní doby UV zářivek
MTLBCN	001	1 1111	0x3F	změna provozní doby celého zařízení

**Tab. 7:** Přehled adres příkazů podskupiny Dotazy I

Symbol. jméno	Pod- skupina	příkaz	HEX	Popis systémové proměnné
	010	0 0000	0x40	
MSYSRQ	010	0 0001	0x41	dotaz na aktuální stav systému
	010	0 0010	0x42	
	010	0 0011	0x43	
	010	0 0100	0x44	
	010	0 0101	0x45	
	010	0 0110	0x46	
	010	0 0111	0x47	
MFN1RQ	010	0 1000	0x48	dotaz na nastavení výkonu ventilátoru 1
MFN2RQ	010	0 1001	0x49	dotaz na nastavení výkonu ventilátoru 2
MTUBRQ	010	0 1010	0x4A	dotaz na nastavení výkonu osvětlení prac. prostoru
MUVMRQ	010	0 1011	0x4B	dotaz na stav zapnutí/vypnutí relé UV
MRGBRQ	010	0 1100	0x4C	dotaz na stav relé - připojení napájení RGB LED pásku
MREDRQ	010	0 1101	0x4D	dotaz na intenzitu červené barvy RGB LED pásku (0-255)
MGRNRQ	010	0 1110	0x4E	dotaz na intenzitu zelené barvy RGB LED pásku (0-255)
MBLURQ	010	0 1111	0x4F	dotaz na intenzitu modré barvy RGB LED pásku (0-255)
MRELQR	010	1 0000	0x50	dotaz na stav pomocného relé
MBUZRQ	010	1 0001	0x51	dotaz na styl zvukového znamení signalizační sirény
MUPORQ	010	1 0010	0x52	dotaz na stav výkonových komplementárních tranzistorů
	010	1 0011	0x53	
MRT0RQ	010	1 0100	0x54	dotaz na hodnoty registru RTC na adrese 0x00 (sekundy)
MRT1RQ	010	1 0101	0x55	dotaz na hodnoty registru RTC na adrese 0x01 (minuty)
MRT2RQ	010	1 0110	0x56	dotaz na hodnoty registru RTC na adrese 0x02 (hodiny; 12/24 formát)
MRT3RQ	010	1 0111	0x57	dotaz na hodnoty registru RTC na adrese 0x03 (dny v týdnu)
MRT4RQ	010	1 1000	0x58	dotaz na hodnoty registru RTC na adrese 0x04 (datum - dny)
MRT5RQ	010	1 1001	0x59	dotaz na hodnoty registru RTC na adrese 0x05 (datum - měsíce)
MRT6RQ	010	1 1010	0x5A	dotaz na hodnoty registru RTC na adrese 0x06 (datum - roky; 00-99)
MRT7RQ	010	1 1011	0x5B	dotaz na hodnoty registru RTC na adrese 0x07 (registr nastavení)
	010	1 1100	0x5C	
MTFLRQ	010	1 1101	0x5D	dotaz na provozní doby filtrů
MTUVRQ	010	1 1110	0x5E	dotaz na provozní doby UV zářivek
MTLBRQ	010	1 1111	0x5F	dotaz na provozní doby celého zařízení

**Tab. 8:** Přehled adres příkazů podskupiny Dotazy II

Symbol. jméno	Pod- skupina	příkaz	HEX	Popis systémové proměnné
	011	0 0000	0x60	
MPDERQ	011	0 0001	0x61	dotaz na stav polohy dvířek u vstupu do prac. prostoru
	011	0 0010	0x62	
MAFLRQ	011	0 0011	0x63	dotaz na hodnotu proudění vzduchu v prac. prostoru
MDFPRQ	011	0 0100	0x64	dotaz na hodnotu tlakové ztráty na HEPA filtrech
MABSRQ	011	0 0101	0x65	dotaz na hodnotu atmosférického tlaku
	011	0 0110	0x66	
MADCRQ	011	0 0111	0x67	dotaz na hodnotu převodu obecného ADC
MUINRQ	011	0 1000	0x68	dotaz na stav univerzálních vstupů
	011	0 1001	0x69	
	011	0 1010	0x6A	
	011	0 1011	0x6B	
	011	0 1100	0x6C	
	011	0 1101	0x6D	
	011	0 1110	0x6E	
	011	0 1111	0x6F	
	011	1 0000	0x70	
	011	1 0001	0x71	
	011	1 0010	0x72	
	011	1 0011	0x73	
	011	1 0100	0x74	
	011	1 0101	0x75	
	011	1 0110	0x76	
	011	1 0111	0x77	
	011	1 1000	0x78	
	011	1 1001	0x79	
	011	1 1010	0x7A	
	011	1 1011	0x7B	
	011	1 1100	0x7C	
	011	1 1101	0x7D	
	011	1 1110	0x7E	
	011	1 1111	0x7F	

**Tab. 9:** Přehled adres příkazů podskupiny Odpovědi I

Symbol. jméno	Pod- skupina	příkaz	HEX	Popis systémové proměnné
	100	0 0000	0x80	
ASRM RP	100	0 0001	0x81	stav systému - servis
AMAM RP	100	0 0010	0x82	stav systému - údržba
ANOM RP	100	0 0011	0x83	stav systému - běžný provoz
ASTM RP	100	0 0100	0x84	stav systému - pohotovostního režim
ADEM RP	100	0 0101	0x85	stav systému - mód dekontaminace prac. prostoru
AEMER P	100	0 0110	0x86	stav systému - mimořádná událost (system state emergency event)
	100	0 0111	0x87	
AFN1RP	100	0 1000	0x88	odpověď - stav výkonu ventilátoru 1 (0 – 100%, krok 10%)
AFN2RP	100	0 1001	0x89	odpověď - stav výkonu ventilátoru 2 (0 – 100%, krok 10%)
ATUBRP	100	0 1010	0x8A	odpověď - stav výkonu osvětlení prac. Prostoru (0 – 100%, krok 10%)
AUVM RP	100	0 1011	0x8B	odpověď - stav zapnutí/vypnutí relé UV
ARGBRP	100	0 1100	0x8C	odpověď - stav relé - připojení napájení RGB LED pásku
AREDRP	100	0 1101	0x8D	odpověď - intenzitu červené barvy RGB LED pásku (0-255)
AGRNRP	100	0 1110	0x8E	odpověď - intenzitu zelené barvy RGB LED pásku (0-255)
ABLURP	100	0 1111	0x8F	odpověď - intenzitu modré barvy RGB LED pásku (0-255)
ARELRP	100	1 0000	0x90	odpověď - stav pomocného relé
ABUZR P	100	1 0001	0x91	odpověď - styl zvukového znamení signalizační sirény
AUPORP	100	1 0010	0x92	odpověď - stav výkonových komplementárních tranzistorů
	100	1 0011	0x93	
ART0RP	100	1 0100	0x94	odpověď - hodnoty registru RTC na adrese 0x00 (sekundy)
ART1RP	100	1 0101	0x95	odpověď - hodnoty registru RTC na adrese 0x01 (minuty)
ART2RP	100	1 0110	0x96	odpověď - hodnoty registru RTC na adrese 0x02 (hodiny; 12/24 formát)
ART3RP	100	1 0111	0x97	odpověď - hodnoty registru RTC na adrese 0x03 (dny v týdnu)
ART4RP	100	1 1000	0x98	odpověď - hodnoty registru RTC na adrese 0x04 (datum - dny)
ART5RP	100	1 1001	0x99	odpověď - hodnoty registru RTC na adrese 0x05 (datum - měsíce)
ART6RP	100	1 1010	0x9A	odpověď - hodnoty registru RTC na adrese 0x06 (datum - roky; 00-99)
ART7RP	100	1 1011	0x9B	odpověď - hodnoty registru RTC na adrese 0x07 (registr nastavení)
	100	1 1100	0x9C	
ATFLRP	100	1 1101	0x9D	odpověď - provozní doby filtrů
ATUVRP	100	1 1110	0x9E	odpověď - provozní doby UV zářivek
ATLBRP	100	1 1111	0x9F	odpověď - provozní doby celého zařízení

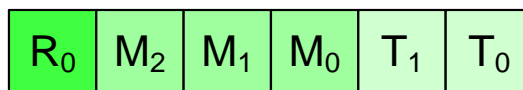
**Tab. 10:** Přehled adres příkazů podskupiny Odpovědi II

Symbol. jméno	Pod- skupina	příkaz	HEX	Popis systémové proměnné
	011	0 0000	0xA0	
APDERP	101	0 0001	0xA1	odpověď - stav polohy dvířek u vstupu do prac. prostoru
	101	0 0010	0xA2	
AAFLRP	101	0 0011	0xA3	odpověď - hodnota proudění vzduchu v prac. prostoru
ADFP RP	101	0 0100	0xA4	odpověď - hodnota tlakové ztráty na HEPA filtrech
AABSRP	101	0 0101	0xA5	odpověď - hodnota atmosférického tlaku
	101	0 0110	0xA6	
AADCRP	101	0 0111	0xA7	odpověď - hodnota převodu obecného ADC
AUINRP	101	0 1000	0xA8	odpověď - stav univerzálních vstupů
	101	0 1001	0xA9	
	101	0 1010	0xAA	
	101	0 1011	0xAB	
	101	0 1100	0xAC	
	101	0 1101	0xAD	
	101	0 1110	0xAE	
	101	0 1111	0xAF	
	101	1 0000	0xB0	
	101	1 0001	0xB1	
	101	1 0010	0xB2	
	101	1 0011	0xB3	
	101	1 0100	0xB4	
	101	1 0101	0xB5	
	101	1 0110	0xB6	
	101	1 0111	0xB7	
ARECCH	101	1 1000	0xB8	potvrzení příjmu dat
ARECST	101	1 1001	0xB9	potvrzení příjmu dat pro příkaz nastavení
ACRCER	101	1 1010	0xBA	chyba kontrolního součtu (CRC)
ACOMER	101	1 1011	0xBB	nesprávná data, příkaz neexistuje
APARER	101	1 1100	0xBC	nesprávná data, nedovolený parametr příkazu
	101	1 1101	0xBD	
	101	1 1110	0xBE	
	101	1 1111	0xBF	

## 4.2.2 Symbolická jména adres příkazů

Pro snadnější orientaci a práci je každé definované adrese příkazu přiděleno symbolické jméno. Definovanou adresou příkazu rozumíme takovou adresu, která po zpracování vyvolá příslušnou reakci (změna nastavení parametrů nebo odpověď na dotaz). Seznam těchto symbolických jmen se součástí specifikace protokolu a proto lze s těmito symbolickými jmény pracovat v obou blocích řídicí elektroniky. Konkrétní symbolická jména přidělená definovaným adresám příkazů jsou uvedena v prvním sloupci přehledových tabulek jednotlivých podskupin příkazů spolu s popisem příslušné reakce (funkce příkazu), viz tab. 6, tab. 7, tab. 8, tab. 9, tab. 10.

Způsob, jakým jsou konkrétní symbolická jména vytvářena, je znázorněn na obr. 11. Podobně jako v případě adresovacího bytu je i zde první pozice symbolického jména označená jako  $R_0$  (direction) určena k rozlišení směru komunikace. Konkrétně tedy k určení, zda se symbolické jméno vztahuje k příkazům odeslaných blokem Hlavní řídicí jednotky nebo blokem Rozšiřujícího modulu, viz tab. 11.



**Obr. 11:** Ukázka struktury symbolického jména adresy příkazu

Další tři pozice ve struktuře symbolického jména jsou určeny k označení konkrétní funkce. Právě toto označení napomáhá k orientaci v práci s konkrétními příkazy. Na obrázku obr. 11 je znázorněna struktura tvorby symbolických jmen. Tři pozice použité k označení funkce příkazu jsou znázorněné symboly  $M_2$ ,  $M_1$  a  $M_0$  (mark).

Zbývající dvě pozice ve struktuře symbolického jména označené jako  $T_1$  a  $T_0$  (type) určují, o jaký typ příkazu se jedná. Slouží tedy jako doplňující popis k označení funkce příkazu. Označení typů příkazů spolu s jejich významem a popisem ukazuje tabulka tab. 12.

**Tab. 11:** Rozlišení směru komunikace u symbolický jmen adres příkazů

$R_0$	Popis
A	příkaz odeslaný blokem Rozšiřujícího modulu
M	příkaz odeslaný blokem Hlavní řídicí jednotky

**Tab. 12:** Rozlišení typu příkazu symbolického jména adresy příkazu

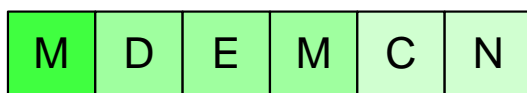
$T_1T_0$	Význam	Popis
CN	nastavení (control)	změna hodnoty systémové proměnné
RQ	dotaz (request)	dotaz na hodnotu systémové proměnné
RP	odpověď (reply)	návratová hodnota systémové proměnné
ER	chyba (error)	chybová návratová hodnota

Způsob jakým jsou vytvářena konečná symbolická jména pro definované adresy příkazů, popisují následující příklady. V příkladech je zobrazen způsob složení symbolického jména dle struktury uvedené na obr. 11. Následující příklady (příklad 1, příklad 2, příklad 3, příklad 4) jsou vybrány tak, aby představovali každý ze čtyř možných typů příkazů.

**Příklad 1:** Příkazová podskupina Nastavení, adresa příkazu 0x25

Funkce příkazu: aktivace módu dekontaminace pracovního prostoru (decontamination mode)

Protože se jedná o příkaz z příkazové podskupiny Nastavení, bude první písmeno symbolického jména M (příkaz odeslán blokem Hlavní řídicí jednotky). Následují tři písmena označující konkrétní funkci. Při označení funkce je vycházeno z anglického překladu českého označení funkce. V tomto případě tedy s počátečních písmen označení **de**contamination **mode**. Poslední dvojici písmen symbolického jména je přesněji určena funkce příkazu. V tomto případě se jedná o funkci nastavení, takže symbolické jméno je zakončeno dvojí písmen CN.

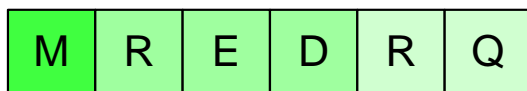


**Obr. 12:** Sestavení symbolického jména, příklad 1

**Příklad 2:** Příkazová podskupina Dotazy I, adresa příkazu 0x4D

Funkce příkazu: dotaz na intenzitu červené barvy RGB LED pásku

Protože se jedná o příkaz z příkazové podskupiny Dotazy I, bude první písmeno symbolického jména M (příkaz odeslán blokem Hlavní řídicí jednotky). Následují tři písmena označující konkrétní funkci. Při označení funkce je vycházeno z anglického překladu českého výrazu červená, tedy **red**. Poslední dvojici písmen symbolického jména je přesněji určena funkce příkazu. V tomto případě se jedná o funkci zjišťující hodnotu systémové proměnné, takže symbolické jméno je zakončeno dvojí písmen RQ.

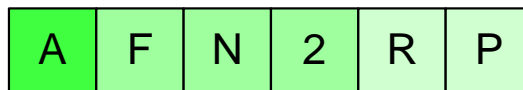


**Obr. 13:** Sestavení symbolického jména, příklad 2

**Příklad 3:** Příkazová podskupina Odpovědi I, adresa příkazu 0x89

Funkce příkazu: odpověď - stav výkonu ventilátoru 2

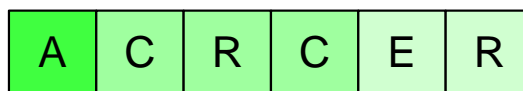
Protože se jedná o příkaz z příkazové podskupiny Odpovědi, bude první písmeno symbolického jména A (příkaz odeslán blokem Rozšiřujícího modulu). Následují tři písmena označující konkrétní funkci. Při označení funkce je vycházeno z anglického překladu českého označení výrazu pro ventilátor, tedy fan. Protože v zařízení jsou namyšlené dva tyto ventilátory, jsou odlišeny označením 1 a 2. V tomto případě se jedná o ventilátor 2 (**fan 2**). Poslední dvojici písmen symbolického jména je přesněji určena funkce příkazu. V tomto případě se jedná o funkci, která vrací hodnotu konkrétní systémové proměnné, takže symbolické jméno je zakončeno dvojí písmen RP.



**Obr. 14:** Sestavení symbolického jména, příklad 3

**Příklad 4:** Příkazová podskupina Odpovědi II, adresa příkazu 0xB9  
Funkce příkazu: chyba kontrolního součtu (CRC)

Protože se jedná o příkaz z příkazové podskupiny Odpovědi II, bude první písmeno symbolického jména A (příkaz odeslán blokem Rozšiřujícího modulu). Následují tři písmena označující konkrétní funkci. Při označení funkce je vycházeno ze zkratky anglického výrazu cyclic redundancy check, tedy CRC. V tomto případě se jedná o chybovou návratovou hodnotu v případě, kdy je detekována chyba kontrolního součtu přijatých dat. Symbolické jméno je zakončeno dvojí písmen ER.

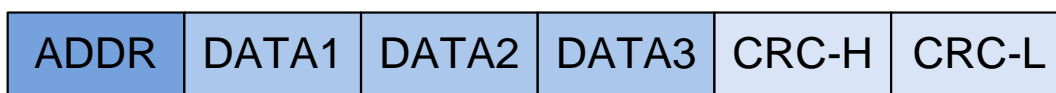


**Obr. 15:** Sestavení symbolického jména, příklad 4

### 4.2.3 Formát datového rámce

Komunikace mezi bloky řídicí elektroniky probíhá pomocí tzv. datových rámců. Pod pojmem datový rámec se skrývá označení pro skupinu bytů, které jsou v rámci komunikace mezi bloky řídicí elektroniky odesílány, přijímány a zpracovávány vždy společně. V rámci specifikace komunikačního protokolu je definován pevný formát takového to datového rámce.

Formát datového rámce zahrnuje volbu počtu bytů, ze kterého se datový rámec skládá (velikost datového rámce) spolu s jejich významem. Význam jednotlivých bytů datového rámce je přímo spjatý s jejich pozicí ve struktuře datového rámce. U datového rámce, který byl přijat jedním z bloků řídicí elektroniky, význam jednotlivých bytů předurčuje, jakým způsobem bude jejich obsah dále zpracováván. U datového rámce, který byl jedním z bloků řídicí elektroniky vytvořen a odeslán, význam jednotlivých bytů předurčuje, co data v nich uložená reprezentují.



**Obr. 16:** Pozice a označení bytů datového rámce

Pevná struktura zvoleného formátu datového rámce je zobrazena na obrázku obr. 16. Použitá velikost šest bytů dostatečně pokrývá potřeby vycházející se současné specifikace protokolu s tím, že byte s označením DATA3 není zatím žádným příkazem používán jako parametr. Tato rezerva může být použita v budoucnu, při dalším vývoji a rozšíření komunikačního protokolu.



První byte datového rámce je dle specifikace formátu datového rámce tzv. adresovací byte (struktura dat bytu viz obr. 10). Tento byte, na obr. 16 označený jako ADDR, nese informaci adresy příkazu. Podle povahy příkazu nastane odpovídající reakce. Pro správnou funkci komunikačního protokolu je bezpodmínečně nutné, aby byl tento byte vždy odesílán, přijímán i zpracováván jako první. Na obsahu bytu ADDR (adresy příkazu) přímo závisí význam následujících dat uložených v tzv. datových bytech. Hodnoty, kterými může být adresovací byte ADDR naplněn je uveden v tabulkách tab. 6, tab. 7, tab. 8, tab. 9, tab. 10 v rámci kapitoly 4.2.1 *Příkazové skupiny*.

Za adresovacím bytem následují tři byty označené na obrázku obr. 16 jako DATA1, DATA2 a DATA3. Jedná se o tzv. datové byty, které nabývají významu podle vybraného příkazu, který jim v datovém rámci předchází.

Posledními dva byty datového rámce obsahují hodnotu kontrolního součtu (CRC). Kontrolní součet je vždy vypočítán z obsahu adresovacího bytu a datových bytů. Vzhledem ke zvolenému generujícímu polynomu CRC může výsledek dosáhnout šířky až šestnáct bitů. Výsledek je rozdělen na dvě osmibitové hodnoty. Byte označený jako CRC-H obsahuje tzv. osm horních bitů (horní byte) výsledku CRC a byte označený jako CRC-L obsahuje tzv. osm spodních bitů (spodní byte) výsledku CRC.

#### 4.2.4 Kontrola dat

Při přípravě datového rámce před odesláním anebo během jeho přenosu může vlivem mnoha různých okolností a vnějších vlivů dojít k poškození obsahu dat datového rámce. Aby bylo možné poškození dat identifikovat a vyhnout se tak zpracovávání chybných datových rámců, je v rámci specifikace protokolu definována metoda kontroly dat.

Z důvodů snadné softwarové implementace algoritmu společně s žádnými speciálními hardwarovými požadavky, byl pro kontroly platnosti dat zvolen způsob tzv. kontrolního součtu realizovaný prostřednictvím techniky cyklického redundantního součtu (CRC). Tento způsob kontroly se běžně v praxi využívá k detekci chyb během přenosu a ukládání dat. Důvodem, že je tak populární je jeho jednoduchost a dobré matematické vlastnosti.

Pro výsledek výpočtu cyklického redundantního součtu jsou rozhodující dva vstupní parametry. Vstupní bitová posloupnost, která reprezentuje zpracovávaná (kontrolovaná) data a bitová posloupnost tzv. generujícího (charakteristického) polynomu. Pokud si tyto bitové posloupnosti představíme jako polynomy, např.  $1001\ 0101 = x^7 + x^4 + x^2 + 1$ , lze si poté operaci výpočtu cyklického redundantního součtu zjednodušeně představit jako operaci dělení polynomu (vstupní data) polynomem (generující polynom). Avšak pro toto tvrzení platí tyto podmínky: Dělení polynomů se provádí v konečném tělese  $GF(2^n)$  a nad koeficienty polynomů je aplikována operace modulo 2 (zbytek po celočíselném dělení dvěma) tzn., že koeficienty polynomů mohou nabývat hodnot 0 nebo 1.

Dělení polynomu polynomem při splnění výše uvedených podmínek lze realizovat elegantně pomocí bitové operace exkluzivního logického součtu (XOR). Bitové operace exkluzivního součtu jsou prováděny nad bitovými posloupnostmi, které reprezentují podobu

vybraného polynomu, např. polynom  $x^5 + x^4 + x + 1$  by byl reprezentován bitovou posloupností 0011 0011 [3].

Při výpočtu cyklického redundantního součtu je prováděna opakovaně (cyklicky) operace XOR nad bitovými posloupnostmi aktuálního vstupního polynomu a generujícího polynomu. Počet kroků výpočtu CRC je dán velikostí inicializačního vstupního polynomu. Po provedení definovaného počtu průchodů algoritmu výpočtu CRC reprezentuje získaná bitová posloupnost zbytek po dělení polynomu polynomem. Velikost (bitová šířka) výsledku algoritmu výpočtu CRC přímo souvisí s velikostí generujícího polynomu. Platí pravidlo, že bitová šířka výsledku algoritmu výpočtu CRC odpovídá bitové šířce generujícího polynomu snížené o jedničku.

Pokud zvolíme pro algoritmus výpočtu CRC generující polynom s bitovou šířkou 6 bitů, bitová šířka výsledku odpovídá 5 bitům. Při volbě generujícího polynomu platí pravidlo, že nejvýznamnější bit bitové posloupnosti reprezentující polynom je vždy jedničkový. Pro předchozí příklad tedy platí, že v generujícím polynomu figuruje prvek  $x^5$ . Tento prvek, přesněji hodnota mocniny vyskytující se v prvku, definuje stupeň polynomu, v tomto případě je generující polynom pátého stupně.

Pro generující polynom např. se zápisem  $x^5 + x^4 + x + 1$  pak může být použito označení CRC5. Číslice uvedená v tomto označení nám tedy říká, že bitová šířka výsledku je pět bitů, generující polynom je pátého stupně, tzn. nejvyšší mocna v polynomu nabývá hodnoty pět a s tím souvisí i bitová šířka generujícího polynom, která je o jedničku větší, tedy šest bitů.

Pro výpočet kontrolního součtu (kontrola přenášených dat) byl v rámci specifikaci komunikačního protokolu zvolen generující polynom s označením CRC16-IBM. Zvolený generující polynom je popsán zápisem  $x^{16} + x^{15} + x^2 + 1$  a tudíž reprezentován bitovou posloupností 1 1000 0000 0000 0101. Z označení generujícího polynomu CRC16 vyplývá, že bitová šířka výsledku je šestnáct bitů; generující polynom je šestnáctého stupně a bitová šířka generujícího polynom, které je o jedničku větší, je sedmnáct. Odtud tedy vychází nutnost, výsledek CRC rozdělit na dvě osmibitová čísla, která jsou pak přenášená datovým rámcem v bytech označených jako CRC-H a CRC-L (obr. 16, kapitola 4.2.3 *Formát datového rámce*).

Při implementaci algoritmu výpočtu CRC se zvoleným generujícím polynomem CRC16-IBM bylo vycházeno s vlastností, že nejvýznamnější bit reprezentující bitové posloupnosti je jedničkový (souvisí s určením stupně polynomu, v našem případě koeficient obsahující mocninu šestnáct nemůže být nulový). Při práci s generujícím polynomem není tato nejvýznamnější jednička přímo používána, ale pro mechanismu výpočtu je využívána. Pro samotný výpočet (aplikace funkce XOR) je používán zredukovaný zápis, který obsahuje zbývajících šestnáct bitů, v implementovaném firmwaru je označen jako POLY a jeho zápis ve formě polynomu vypadá takto:  $x^{15} + x^2 + 1$  (1000 0000 0000 0101).

Specifikace protokolu definuje, že pro jakýkoliv datový rámec je algoritmus kontroly dat použit vždy dvakrát. Poprvé při vytváření datového rámce (příprava dat k odeslání) a podruhé při zpracování datového rámce (kontrola integrity přijatých dat).

Před odeslání datového rámce je z hodnot adresovacího bytu ADDR a datových bytů DATA1, DATA2 a DATA3 (viz obr. 16) vypočtena odesílaná hodnota CRC. Ta je poté uložena do bytů kontrolního součtu CRC-H a CRC-L. Datový rámec je takto připraven k odeslání. Pro náhled funkce, implementované v komunikačním protokolu, která provádí výpočet odesílané hodnoty CRC viz příklad 6.

Při přijetí datového rámce je z hodnot adresovacího bytu ADDR, datových bytů DATA1, DATA2 a DATA3 a bytů kontrolního součtu CRC-H a CRC-L (viz obr. 16) vypočtena přijímaná hodnota CRC. Při výpočtu CRC přijatého datového rámce, je využívána další zajímavá vlastnost algoritmu CRC. Platí totiž, že pokud se za data, ze kterých je CRC vypočten, přidá právě výsledek CRC a nad takto nově vzniklým souborem dat se provede opět výpočet CRC (musí být použit totožný generující polynom), mohou nastat následující dvě situace. Pokud nedojde během přenosu dat k jejich poškození (změně) a data tudíž dorazí v pořádku je vypočtená hodnota CRC přijatého datového rámce nula. V opačném případě může vypočtená hodnota CRC přijatého datového rámce nabývat libovolných hodnot různých od nuly.

V rámci implementace komunikačního protokolu je této vlastnosti využíváno během zpracování přijatého datového rámce. Tím je zamezeno, aby byla k dalšímu zpracování použita neúplná, nebo jiným způsobem poškozená data. Poškozená data se mohou nacházet v jakékoli části datového rámce.

Způsobů výpočtu CRC je více. Dokonce i pokud jsou použita totožná vstupní data a shodný generující polynom, může se výsledek dvou různých algoritmů výpočtu CRC od sebe lišit. Záleží například i na počáteční hodnotě proměnné, do které je výsledek ukládán. Podmínkou zůstává, aby byl v rámci jednoho systému používán shodný algoritmu výpočtu CRC. Nejnázornější způsob možného výpočtu CRC ukazuje příklad 5. Způsob, který je implementován v komunikačním protokolu přibližuje příklad 6.

#### **Příklad 5:** Ukázka způsobu výpočtu CRC

Generující polynom:  $G(x) = 1\ 1000\ 0000\ 0000\ 0101$

Vstupní data:  $M(x) = 1010\ 0011\ 0100\ 1001$

Před samotným výpočtem je nutné mít definovaná vstupní data a generující polynom. Pokud jsou tyto podmínky splněny, lze přejít k samotnému výpočtu CRC. Prezentovaný způsob výpočtu nejprve požaduje, aby bylo za vstupní data přidáno takové množství nul, jaký je stupeň generujícího polynomu (šedé nuly). Poté jsou postupně testovány hodnoty bitů vstupních dat od nejvýznamnějšího po nejméně významný. V okamžiku, kdy je na testované pozici v bytu vstupních dat, jednička, je proveden exklusivní součet (XOR) v aktuálním vzájemném posunutí. Jedničkové bity v bytu vstupních dat jsou postupně nulovány a do případných nul za vstupní data jsou postupně posouvána data, které reprezentují výsledný CRC. Platné bity výsledku jsou zobrazeny modře.

test = 1	<u>1010 0011 0100 1001 0000 0000 0000 0000</u>
	<u>1100 0000 0000 0010 1</u>
XOR	0110 0011 0100 1011 1000 0000 0000 0000
test = 1	<u>0110 0011 0100 1011 1000 0000 0000 0000</u>
	<u>110 0000 0000 0001 01</u>
XOR	0000 0011 0100 1010 1100 0000 0000 0000
test = 0	00 <u>00</u> 0011 0100 1010 1100 0000 0000 0000
test = 0	000 <u>0</u> 0011 0100 1010 1100 0000 0000 0000
test = 0	0000 <u>0</u> 011 0100 1010 1100 0000 0000 0000
test = 0	0000 0 <u>0</u> 11 0100 1010 1100 0000 0000 0000
test = 1	0000 00 <u>1</u> 1 0100 1010 1100 0000 0000 0000
	<u>11 0000 0000 0000 101</u>
XOR	0000 0000 0100 1010 1100 1010 0000 0000
test = 0	0000 000 <u>0</u> 0100 1010 1100 1010 0000 0000
test = 0	0000 0000 <u>0</u> 100 1010 1100 1010 0000 0000
test = 1	0000 0000 0 <u>1</u> 00 1010 1100 1010 0000 0000
	<u>110 0000 0000 0001 01</u>
XOR	0000 0000 0010 1010 1100 1011 0100 0000
test = 1	0000 0000 00 <u>1</u> 0 1010 1100 1011 0100 0000
	<u>11 0000 0000 0000 101</u>
XOR	0000 0000 0001 1010 1100 1011 1110 0000
test = 1	0000 0000 000 <u>1</u> 1010 1100 1011 1110 0000
	<u>1 1000 0000 0000 0101</u>
XOR	0000 0000 0000 0010 1100 1011 1011 0000
test = 0	0000 0000 0000 <u>0</u> 010 1100 1011 1011 0000
test = 0	0000 0000 0000 0 <u>0</u> 10 1100 1011 1011 0000
test = 1	0000 0000 0000 00 <u>1</u> 0 1100 1011 1011 0000
	<u>11 0000 0000 0000 101</u>
XOR	0000 0000 0000 0001 1100 1011 1011 1010
test = 1	0000 0000 0000 000 <u>1</u> 1100 1011 1011 1010
	<u>1 1000 0000 0000 0101</u>
XOR	0000 0000 0000 0000 <b>0100 1011 1011 1111</b>

### Příklad 6: Implementovaný způsob výpočtu CRC

Před samotným výpočtem je nutné mít definovaná vstupní data a upravený generující polynom. Pokud jsou tyto podmínky splněny, lze přejít k samotnému výpočtu CRC.

Pro implementovaný způsob výpočtu jsou nejprve vstupní data ve formátu šestnáctibitové hodnoty uložena do proměnné typu pole obsahující dva prvky. Proměnná typu pole je procházena vnějším cyklem for ve dvou krocích. Vnitřní cyklus for je procházen v šestnácti krocích.

Ve vnějším cyklu jsou vstupní data načtena do pracovní proměnné reprezentující výsledek CRC. Ve vnitřním cyklu proběhne kontrola hodnoty nejvýznamnějšího bitu v bytu pracovní proměnné výsledku. Pokud je nulový dojde pouze k rotaci dat uložených v pracovní proměnné výsledku o jeden bit doleva. Pokud je jedničkový dojde nejprve k rotaci dat uložených v pracovní proměnné výsledku o jeden bit doleva. Poté je provedena logická funkce exkluzivního součtu obsahu dat pracovní proměnné výsledku a upravené hodnoty generujícího polynomu.

Rotace obsahu pracovní proměnné výsledku zde byla provedena z důvodu, že úpravou generujícího polynomu jsme se zbavili nejvýznamnějšího bitu. Jednalo se o sedmáctý bit. Rotací obsahu se vlastně šestnáctý bit dostal virtuálně na pozici sedmáctého bitu. Protože při logické operaci XOR mezi dvěma jedničkami je výsledkem nula, která by při dalším kroku výpočtu znamenala pouze rotaci dat v pracovní proměnné výsledku doleva, můžeme se této nuly tímto způsobem zbavit. Tato skutečnost tedy umožňuje, aby byl generující polynom upraven způsobem, kdy se výpočet (aplikace operace XOR) neprovádí přímo s nejvýznamnějším bitem generujícího polynomu, ale existence jeho jedničkové hodnoty přímo ovlivňuje, kdy bude operace XOR na data v pracovní proměnné výsledku a upravený generujícího polynomu aplikována.

Následující ukázka zdrojového kódu představuje funkci, která je používána k výpočtu odesílané hodnoty CRC. Touto hodnotou je posléze datový rámec doplněn a odeslán.

```
#define POLY 0x8005 //upraveny generujici polynom
// (1000 0000 0000 0101)

void CRC_tx (char command,
             char data1, char data2, char data3,
             char *CRC_res_H, char *CRC_res_L) {

    short int CRC_in[2];
    short int CRC_res = 0;
    char word_step;
    char bit_step;

    CRC_in[1] = command;
    CRC_in[1] = CRC_in[1] << 8;
    CRC_in[1] |= data1;
    CRC_in[0] = data2;
    CRC_in[0] = CRC_in[0] << 8;
    CRC_in[0] |= data3;
```

```

for (word_step = 2; 0 < word_step; word_step--){

    CRC_res ^= CRC_in[word_step - 1];

    for (bit_step = 0; 16 > bit_step; bit_step++){

        if (CRC_res & 0x8000){
            CRC_res = CRC_res << 1;
            CRC_res ^= POLY;
        }
        else{
            CRC_res = CRC_res << 1;
        }
    }
}
*CRC_res_L = CRC_res;
CRC_res = CRC_res >> 8;
*CRC_res_H = CRC_res;
}

```

## 4.3 Způsob komunikace mezi bloky řídicí elektroniky

Specifikace protokolu jasně definuje vzájemné postavení bloků řídicí elektroniky při komunikaci prostřednictvím komunikačního protokolu. Blok Hlavní řídicí jednotky v postavení master (nadrízený) a blok Rozšiřujícího modulu v postavení slave (podřízený). Zmíněné postavení, a tím i způsob vystupování na sběrnici, je bloky řídicí elektroniky striktně dodržováno.

Blok hlavní řídicí jednotky v postavení master řídí probíhající komunikaci po sběrnici. Na základně zpracování pokynů od obsluhy ovládající zařízení, může získat pokyny pro provedení nějakých změn, nebo získání některé ze stavových informací. To způsobí zahájení komunikace s blokem Rozšiřujícího modulu, který pracuje v postavení slave. Blok Rozšiřujícího modulu nikdy nezahajuje komunikaci, pouze naslouchá na sběrnici a čeká, dokud není přijat kompletní datový rámec. Následuje adekvátní reakce podle typu příkazu a parametrů získaných v přijatém datovém rámci.

### 4.3.1 Odesílání datového rámce

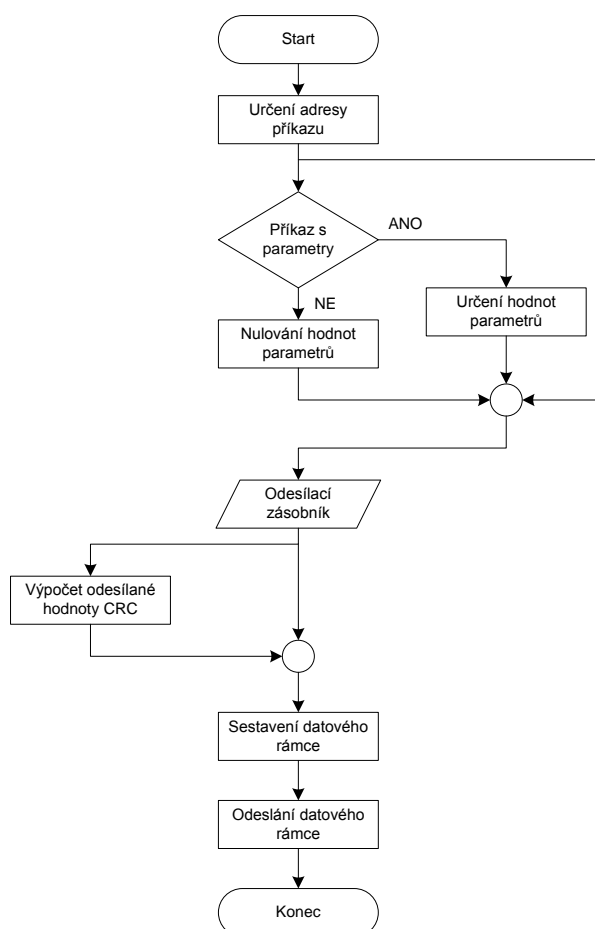
Způsob, jakým jsou datové rámce před jejich odesláním vytvářeny, je v obou blocích řídicí elektroniky shodný. Jediným drobnějším rozdílem je událost, která předchází spuštění procesu sestavení a následného odeslání datového rámce.

V bloku Hlavní řídicí jednotky je takou událostí interakce obsluhy zařízení, která pomocí ovládacích prvků uživatelské aplikace vytvoří požadavek buď na změnu nastavení systémové proměnné, nebo na získání hodnoty některé ze systémových nebo provozních proměnných. V těchto případech se pak jedná o příkazy typu Nastavení nebo Dotazy.

V bloku Rozšiřujícího modulu je proces sestavení a odeslání datového rámce podnícen předchozím příjmem datového rámce od bloku Hlavní řídicí jednotky. Mohou nastat dva případy, kdy je provedeno sestavení a odeslání datového rámce.

Prvním případem je úspěšný příjem jakéhokoliv datového rámce, tím je myšleno, že musí splňovat požadavek specifikace datového rámce především z hlediska jeho velikosti. Pokud je tedy přijato šest za sebou následujících bytů, je tato šestice bytů považována za jeden datový rámec. V zápětí po přijetí šestého bytu je spuštěn proces sestavení a odeslání tzv. potvrzovacího datového rámce. Tímto způsobem blok Rozšiřujícího modulu oznamuje bloku Hlavní řídicí jednotky úspěšné přijetí datového rámce. Tento datový rámec je odesílán vždy, ještě před dalším zpracováním dat přijatého datového rámce.

Druhým případ spuštění procesu sestavení a odeslání datového rámce nastane, byl-li v předchozím datovém rámci rozpoznán příkaz s příkazových podskupin Dotazy a tudíž existuje požadavek bloku Hlavní řídicí jednotky na aktuální hodnotu některé systémové provozní proměnné. Na základě hodnoty adresy příkazu v přijatém předchozím datovém rámci jsou provedeny příslušné akce (spuštěny části programu) tak, aby byla získána aktuální data dle požadavku vyhodnocovaného příkazu.



**Obr. 17:** Vývojový diagram odesílání datového rámce

Před odeslání datového rámce, jsou hodnoty jednotlivých bytů ukládány do odesílacího zásobníku. Adresovací byte ADDR je naplněn vždy a to hodnotou adresy příkazu odpovědi. Podle zvoleného typu příkazu odpovědi, pak mohou následovat další data (parametry), uložené v datových bytech DATA1, DATA2 a DATA3. Na závěr je proveden výpočet odesílaného výsledku CRC, který je ve dvou částech uložen v bytech označených jako CRC-H a CRC-L. Výpočet CRC je prováděn vždy těsně před odesláním datového rámce, aby bylo zaručeno, že data v odesílacím zásobníku jsou aktuální a platná pro právě probíhající proces sestavení a odeslání datového rámce.

### 4.3.2 Příjem datového rámce

Způsob, jakým jsou data datové rámce po jejich přijetí dále zpracovávány, je v obou blocích řídicí elektroniky shodný. Jediným drobnějším rozdílem je způsob práce s datovými rámci a doprovodné procesy spouštěné v souvislosti s jejich zpracováním.

Blok Hlavní řídicí jednotky je v postavení Master, z toho vyplývá, že vždy řídí komunikaci v rámci komunikačního protokolu. Do stavu, kdy očekává příjem datových rámců, se dostane vždy, po odeslání jakéhokoliv datového rámce. Tento stav přetrvává do okamžiku příjmu tzv. potvrzovacího datového rámce, který blok Rozšiřujícího modulu odesílá vždy, když úspěšně přijme jakýkoliv datový rámec. Za potvrzovacím datovým rámcem následuje vždy datový rámec, typu Odpověď. Pokud předchozí datový rámec obsahoval příkaz typu Nastavení, je smyslem následujícího datového rámce s příkazem typu Odpověď kontrola, zda byla provedena změna systémové proměnné správně. Pokud předchozí datový rámec obsahoval příkaz typu Dotaz, je smysl následujícího datového rámce právě odpověď. Poté je stav očekávání příjmu datových rámců ukončen.

Při příjmu dat blokem Hlavní řídicí jednotky může nastat ještě třetí případ. Za potvrzovacím datovým rámcem může následovat tzv. chybový datový rámec. Při zpracování přijatého datového rámce blokem Rozšiřujícího modulu, může být detekována chyba CRC, nebo chyba ve smyslu nedefinované adresy příkazu. O výskytu chyby je blok Hlavní řídicí jednotky informován prostřednictvím chybového datového rámce. V případě příjmu chybového datového rámce je nutné provést v rámci bloku Hlavní řídicí jednotky znovu sestavení a odeslání datového rámce.

V případě, že blok Hlavní řídicí jednotky přijme jakýkoliv datový rámec, je provedena kontrola integrity dat. Pokud je vypočtená přijímaná hodnota CRC různá do nuly, předpokládá se, že během přenosu dat došlo k jejich poškození. Data přijatá v datovém rámci jsou zahozena. Pokud je chyba detekována již při příjmu kontrolního datového rámce, je automaticky následující datový rámec rovněž zahozen. Pokud je chyba detekována až při příjmu datového rámce následujícího za potvrzující datovým rámcem, je i v tomto případě datový rámec zahozen.

Blok Rozšiřujícího modulu je v postavení Slave, takže jakákoliv komunikace probíhá pouze na základě požadavku od bloku Hlavní řídicí jednotky. Při své běžné činnosti je nastaven do stavu, kdy může přijímat jakýkoliv datový rámec definovaného formátu. Po



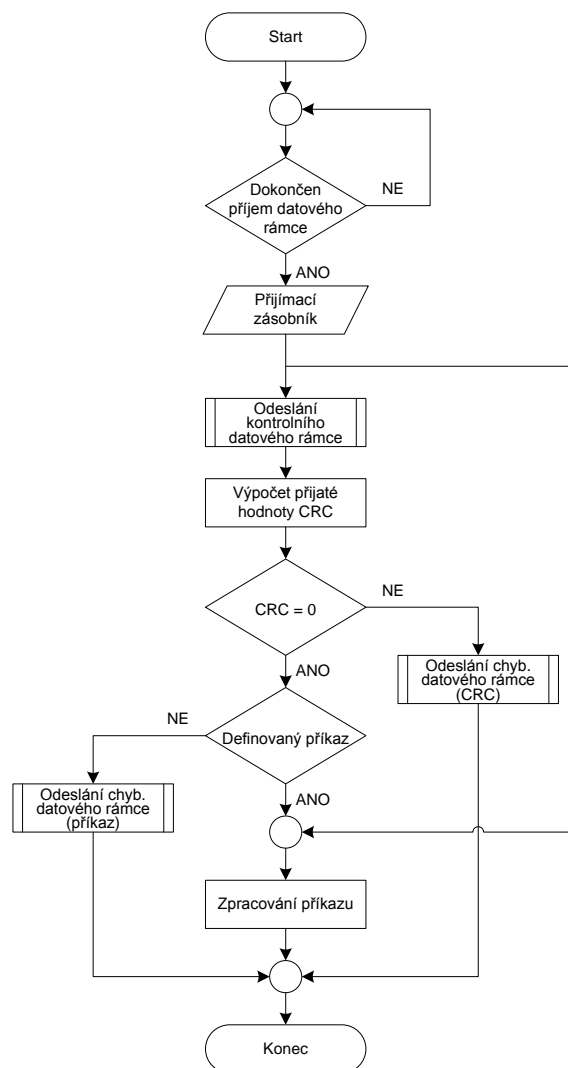
dokončení příjmu dat přejde do stavu zpracování přijatého datového rámce, kdy nepřijímá další datové rámce.

Před samotným zpracováním dat datového rámce, a následné požadované reakce, blok Rozšiřujícího modulu odešle tzv. potvrzovací datový rámec. Tím je blok Hlavní řídicí jednotky informován o úspěšném doručení datového rámce a jeho probíhajícím zpracování.

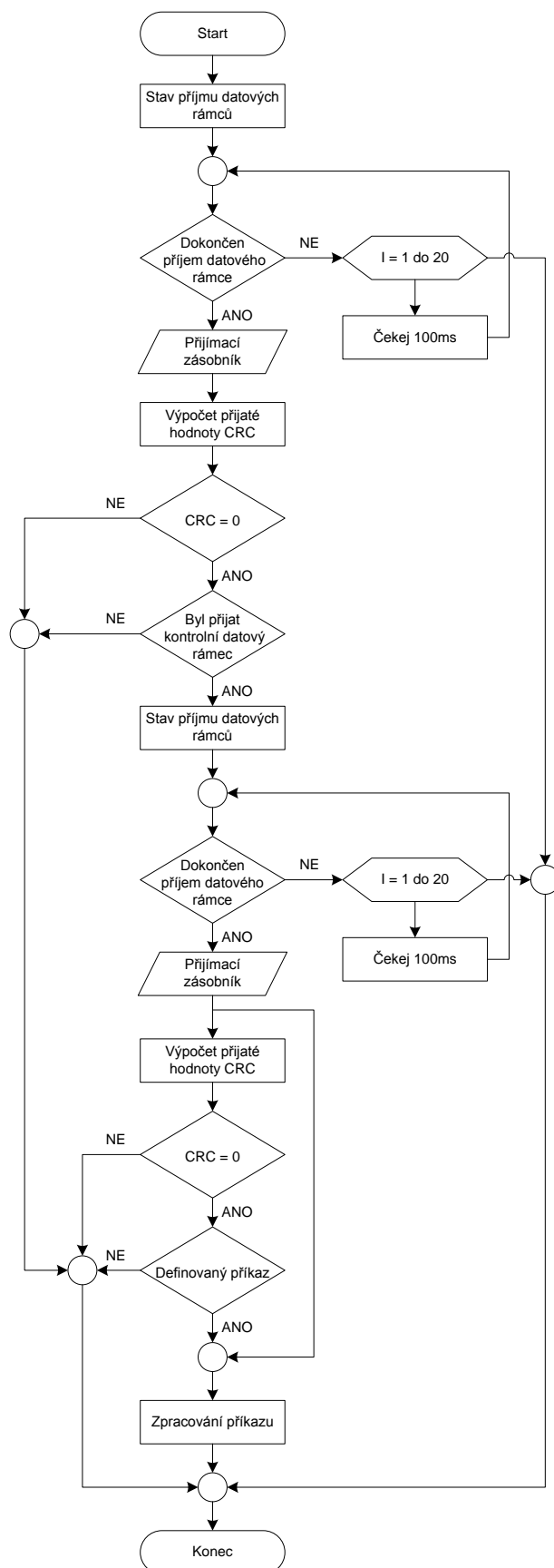
Prvním krokem při příjmu jakéhokoliv datového rámce je jako v případě bloku Hlavní řídicí jednotky kontrola integrity dat. Pokud je vypočtená přijímaná hodnota CRC různá do nuly, předpokládá se, že během přenosu dat došlo k jejich poškození. Data datového rámce nejsou dále zpracovávána. Bloku Hlavní řídicí jednotky je tato skutečnost oznámena prostřednictvím odeslaného chybového datového rámce identifikující chybu CRC. Blok Rozšiřujícího modulu se vrátí do stavu běžné činnosti a je připraven přijímat jakýkoliv datový rámec definovaného formátu.

Pokud je vypočtená přijímaná hodnota CRC rovná nule, předpokládá se, že přijatá data jsou v pořádku. Následuje jejich další zpracování. Prvním krokem při zpracování přijatého datového rámce je na základě hodnoty adresovacího bytu ADDR určit, o jaký příkaz se jedná. Na základě určení příkazu je definovaným způsobem pracován obsah datových bytů DATA1, DATA2 a DATA3. Pokud není při zpracování adresovacího bytu ADDR nalezena shoda s definovanými adresami příkazů, jsou data přijatého datového rámce zahozena. V bloku Hlavní řídicí jednotky tato událost vyvolá opětovné odeslání příkazu dotazu a čekání na odpověď. V bloku Rozšiřujícího modulu tato událost vyvolá odeslání chybového datového rámce identifikující chybu příkazu. Pokud je při zpracování adresovacího bytu ADDR nalezena shoda s definovanými adresami příkazů, jsou data přijatého datového dále zpracovávána.

U bezparametrových příkazů jsou datové byte zcela ignorovány. U příkazů s jedním parametrem je k dalšímu zpracování použit obsah datového bytu DATA1, obsah zbylých dvou datových bytů je ignorovány. U příkazů s dvěma parametry je k dalšímu zpracování použit obsah datových bytů DATA1 a DATA2, obsah zbylého datového bytu je ignorován. V současné podobě specifikace komunikačního protokolu zatím žádný z příkazů nepoužívá tři parametry, z toho vyplývá, že obsah datového bytu DATA3 je zatím vždy ignorován. Tento byte slouží jako rezerva pro další možnosti úpravy specifikace komunikačního protokolu v budoucnosti.



**Obr. 18:** Vývojový diagram příjmu dat blokem Rozšiřujícího modulu



**Obr. 19:** Vývojový diagram příjmu dat blokem Hlavní řídicí jednotky

### 4.3.3 Příklad komunikace mezi bloky řídicí elektroniky

Náhledové tabulky představují jakýsi přepis datových rámců pobíhajících po sběrnici během komunikace bloků řídicí elektroniky.

Tabulka tab. 13 ukazuje průběh komunikace při použití příkazu typu Nastavení. Tabulka tab. 14 ukazuje průběh komunikace při použití příkazu Dotazu. Tabulka tab. 15 ukazuje průběh komunikace při použití příkazu z příkazové podskupiny Dotazy II s adresou, která nepatří mezi tzv. definované adresy. V tomto příkladu je dokonce použita nesprávná hodnota CRC. Chyba výpočtu hodnoty CRC má vyšší prioritu a proto chyba nesprávného (nedefinovaného) příkazu není detekována. Detekce této chyby ukazuje příklad uvedená v tabulce tab. 16.

**Tab. 13:** Příklad komunikace mezi bloky řídicí elektroniky, příkaz typu Nastavení

Datový rámec	Hlavní řídicí jednotka	Rozšiřující modul	Popis
1	2D 1A 00 00 65 C4		nastavení intenzity červené barvy RGB LED pásku
2		B8 00 00 00 60 36	potvrzení příjmu dat
3		8D 1A 00 00 65 F7	Odpověď - hodnota intenzity červené barvy RGB LED pásku (kontrola nastavení)

**Tab. 14:** Příklad komunikace mezi bloky řídicí elektroniky, příkaz typu Dotaz

Datový rámec	Hlavní řídicí jednotka	Rozšiřující modul	Popis
1	4D 00 00 00 E4 1E		dotaz na intenzitu červené barvy RGB LED pásku
2		B8 00 00 00 60 36	potvrzení příjmu dat
3		8D 1A 00 00 65 F7	Odpověď - hodnota intenzity červené barvy RGB LED pásku

**Tab. 15:** Příklad komunikace mezi bloky řídicí elektroniky, chyba CRC

Datový rámec	Hlavní řídicí jednotka	Rozšiřující modul	Popis
1	62 00 23 00 E0 00		Příkaz s příkazové podskupiny Dotazy II, chybná hodnota CRC
2		B8 00 00 00 60 36	potvrzení příjmu dat
3		BA 00 00 00 C8 35	chyba kontrolního součtu (CRC)

**Tab. 16:** Příklad komunikace mezi bloky řídicí elektroniky, nedefinovaná adresa příkazu

Datový rámec	Hlavní řídicí jednotka	Rozšiřující modul	Popis
1	62 00 23 00 E2 11		Příkaz s příkazové podskupiny Dotazy II, jehož adresa není definována
2		B8 00 00 00 60 36	potvrzení příjmu dat
3		BB 00 00 00 5C 36	nesprávná data, příkaz neexistuje

## Závěr

V práci byla provedena základní kategorizace laboratorních boxů pracujících s laminárním prouděním a to s ohledem ke směru proudění a jeho funkci vzhledem k ochraně operátora a vzorků. Dále byla provedena specifikace funkčních požadavků na zařízení spolu s jejich rozdělením do 3 oblastí. Na to v další části navazuje popis koncepce navrženého řešení spolu s výběrem komponent, pro možnou realizaci uvedeného zamýšleného řešení.

Na základě výroby prototypové desky plošných spojů pro senzory diferenčního tlaku a absolutního (atmosférického tlaku) byly na základě měření vybrány vhodné senzory pro použití v této aplikaci. Hlavními kritérii při výběru byl rozsah napájecího napětí, pracovní rozsah měřené tlaku, citlivost v dané pracovní oblasti tlaků, rozsah výstupního signálu.

V dalším kroku byly provedeny testy vytypovaných senzorů proudění vzduchu pro měření rychlosti laminárního proudění v pracovním prostoru. Jedinou nevýhodou testovaných senzorů proudění byl velmi drobný konektor pro připojení vodičů napájení a výstupního signálu.

Dále byla v návrhovém prostředí pro tvorbu desek plošných spojů vytvořena DPS Rozšiřujícího modulu. Vzhledem k prototypovému charakteru výrobku není aktuální velikost DPS optimalizována vzhledem k prostorové náročnosti umístění a ceny výroby. DPS je opatřena navíc například indikačními LED, tlačítky volným vstupem analogovo-digitálního převodníku, univerzálními vstupy a výstupy. Tyto prvky se po funkčních testech mohou vyhodnotit jako nadbytečné. Poté by mohlo dojít k redukci plochy DPS Rozšiřujícího modulu až o polovinu.

V závěru práce je popsána specifikace návrhu struktury komunikačního protokolu a jeho vlastností. Rozdělení příkazů podle funkce do příkazových podskupin. Je vysvětlen mechanismu tvorby symbolických jmen adres příkazů. Symbolická jména usnadňují práci s adresami příkazů a zjednodušují jejich rozlišení. V rámci specifikace protokolu je definován a vysvětlen pojem datový rámec společně s jeho formátem. Formát v sobě zahrnuje velikost datového rámce a význam jednotlivých bytů v datovém rámci. Následuje část věnovaná popisu volby způsobu kontroly odesílaných a přijímaných dat v rámci komunikace bloků řídicí elektroniky doplněná o ukázkou implementace zvoleného algoritmu.

## Seznam literatury

- [1] ATMEL. AT90USB647 : *katalogový list* [online]. 2011 [cit. 2014-05-12]. Dostupné z WWW: <<http://www.atmel.com/Images/doc7593.pdf>>.
- [2] BERAN, Vlastimil, Josef GIRG a Olga TŮMOVÁ. *Měření neelektrických veličin*. 1. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 1994, 189 s. ISBN 80-7082-158-2.
- [3] Cyklický redundantní součet. Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2006 [cit. 2015-05-11]. Dostupné z WWW: <[https://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Cyklick%C3%BD\\_redundantn%C3%AD\\_sou%C4%8Det&redirect=no#Implementace](https://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Cyklick%C3%BD_redundantn%C3%AD_sou%C4%8Det&redirect=no#Implementace)>
- [4] EBM-PAPST. R3G250-RE09-07 : *katalogový list* [online]. 2012 [cit. 2014-05-22]. Dostupné z WWW: <<http://img.ebmpapst.com/products/datasheets/EC-centrifugal-fan-R3G250RE0907-ENG.pdf>>.
- [5] EMBEST TECHNOLOGY CO, LTD. MarS Board : *katalogový list* [online]. 2013 [cit. 2014-05-10]. Dostupné z WWW: <[https://www.dropbox.com/s/617olq1nxzj3cgh/MarS%20Board%20User%20Manual\\_V1.2.pdf](https://www.dropbox.com/s/617olq1nxzj3cgh/MarS%20Board%20User%20Manual_V1.2.pdf)>
- [6] Future Technology Devices International Limited. FT232R USB UART IC: *katalogový list* [online]. 2012 [cit. 2015-04-24]. Dostupné z WWW: <[http://www.ftdichip.com/Support/Documents/DataSheets/ICs/DS\\_FT232R.pdf](http://www.ftdichip.com/Support/Documents/DataSheets/ICs/DS_FT232R.pdf)>
- [7] GANSSLE, Jack G et al. *Embedded systems*. Amsterdam: Elsevier, c2008, xvii, 563 s. ISBN 978-0-7506-8625-9.
- [8] KINGBRIGHT ELECTRONIC CO., LTD. KTIR0911S : *katalogový list* [online]. 2013 [cit. 2014-05-24]. Dostupné z WWW: <[http://www.kingbright.com/attachments/file/psearch/000/00/00/KTIR0911S\(Ver.9\).pdf](http://www.kingbright.com/attachments/file/psearch/000/00/00/KTIR0911S(Ver.9).pdf)>.
- [9] LI, Qing a Caroline YAO. *Real-time concepts for embedded systems*. San Francisco: CMP Books, 2003, xii, 294 s. ISBN 1-57820-124-1.
- [10] MUSIL, Vladislav, Tomáš PIVOVAR, Petr ZEMAN, Josef ŠANDERA a Jiří ŠPINKA. *Konstrukce a technologie elektronických zařízení*. 1. vyd. Brno: VUT, 1994, 324 s. ISBN 80-214-0590-2.
- [11] OLIMEX, LTD. A13-LCD7-TS : *katalogový list* [online]. 2010 [cit. 2014-05-22]. Dostupné z WWW: <<https://www.olimex.com/Products/OLinuXino/A13/A13-LCD7-TS/resources/AT070TN90.pdf>>.

- [12] OLIMEX, LTD. A20-OLinuXino-MICRO-4GB : *katalogový list* [online]. 2013 [cit. 2014-05-22]. Dostupné z WWW: <<https://www.olimex.com/Products/OLinuXino/A20/A20-OLinuXino-MICRO-4GB/resources/A20-OLinuXino-Micro.pdf>>.
- [13] OMRON CORPORATION. D6F-PH : *katalogový list* [online]. 2010 [cit. 2014-05-24]. Dostupné z WWW: <[http://www.omron.com/ecb/products/pdf/en-d6f\\_ph.pdf](http://www.omron.com/ecb/products/pdf/en-d6f_ph.pdf)>.
- [14] SILICON MICROSTRUCTURES, INC. SM5470-001-D-B : *katalogový list* [online]. 2011 [cit. 2014-05-22]. Dostupné z WWW: <[http://www.si-micro.com/upload/product/pdf/SM5430\\_SM5470\\_Datasheet.pdf](http://www.si-micro.com/upload/product/pdf/SM5430_SM5470_Datasheet.pdf)>.
- [15] SILICON MICROSTRUCTURES, INC. SM5852-001-D-3-LR : *katalogový list* [online]. 2013 [cit. 2014-05-20]. Dostupné z WWW: <[http://www.si-micro.com/upload/product/pdf/SM5852\\_001\\_Datasheet.pdf](http://www.si-micro.com/upload/product/pdf/SM5852_001_Datasheet.pdf)>.
- [16] TORADEX AG. Colibri T20 : *katalogový list* [online]. 2012 [cit. 2014-05-10]. Dostupné z WWW: <<http://docs.toradex.com/100001-colibri-t20-datasheet.pdf>>.
- [17] VISHAY INTERTECHNOLOGY. SFH615A-2h : *katalogový list* [online]. 2012 [cit. 2014-05-12]. Dostupné z WWW: <<http://www.vishay.com/docs/83433/sfh615a.pdf>>.
- [18] ZEHNULA, Karel. *Převodníky fyzikálních veličin*. 3. přepr.vyd. Brno: VUT, 1990, 155 s. ISBN 80-214-0157-5.

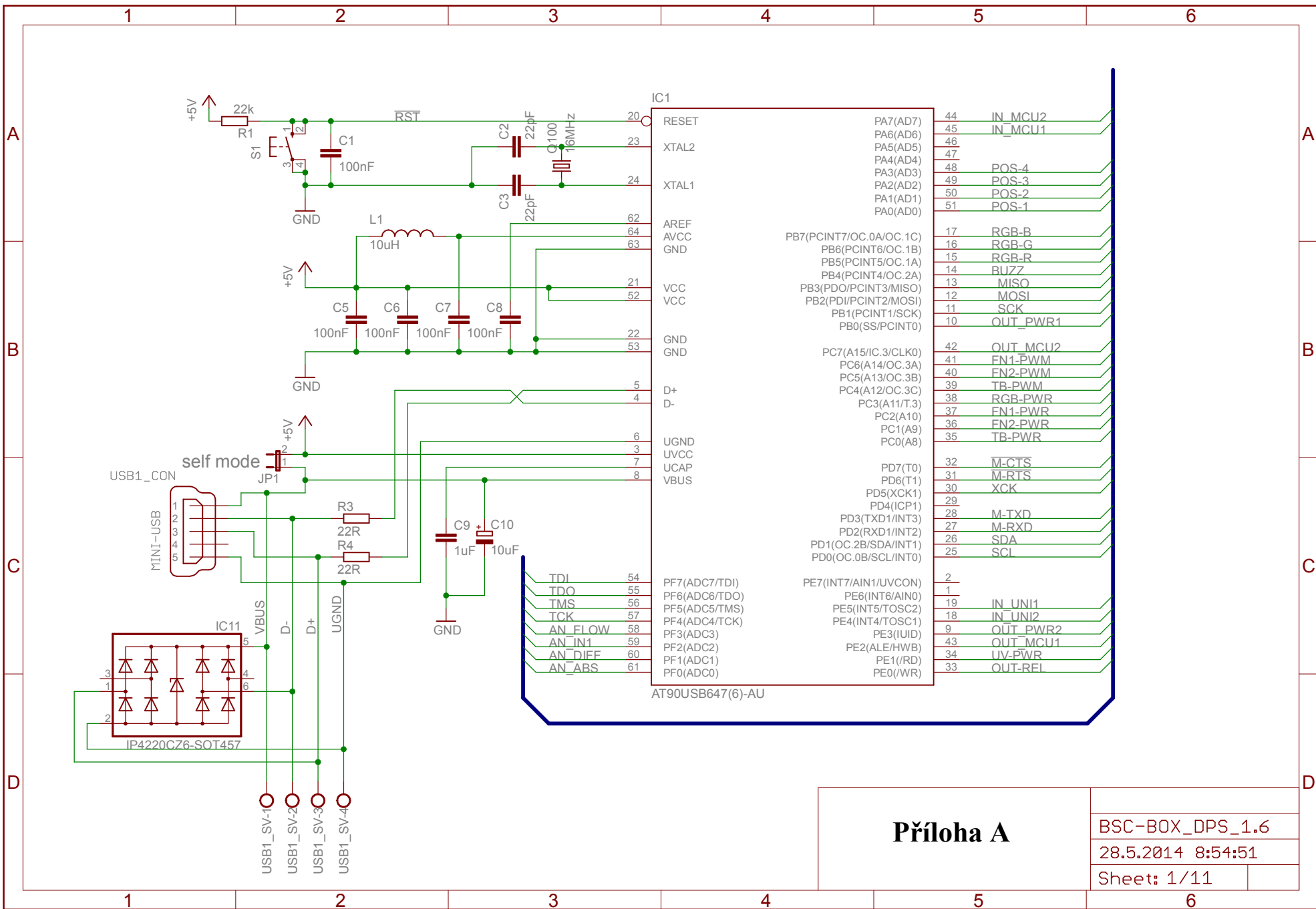


## Seznam zkratek

A/D.....	analogovo-digitální převodník
COM.....	computer on module
CRC.....	cyclic redundancy check
D/A.....	digitálně-analogový převodník
DDR3 .....	double data rate 3. generace
DPS .....	deska plošných spojů
EEPROM .....	electrically erasable erogrammable ROM
eMMC .....	embedded multimedia card
f/U .....	převodník frekvence na napětí
GB .....	giga byte
HDMI.....	high-definition multimedia interface
HEPA .....	high efficiency particulate air filter
HMI.....	human machine interface
LCD.....	liquid crystal display
LED.....	light emitting diode
MAC adresa .....	media access control adres
MMC.....	multimedia card
MSB .....	most significant bit
PC.....	personal komputer
PCB .....	printed curcuit board
PWM.....	pulse width modulation
RAM.....	random access memory
RGB .....	red-green-blue
ROM.....	read only memory
SBC .....	single board komputer
SD.....	secure digital
SOM.....	system on module
TFT.....	thin film transistor
USB .....	universal serial bus
USB-OTG .....	USB on-the-go
VGA .....	video graphics array

## Seznam příloh

- Příloha A: Schéma zapojení AT90USB647-AU
- Příloha B: Schéma zapojení relé, tranzistorové pole ULN2003
- Příloha C: Schéma zapojení relé, tranzistory pro ovládání RGB
- Příloha D: Schéma zapojení konektory pro vyhodnocení pozice dveří
- Příloha E: Schéma zapojení konektorů ISP/SPI, JTAG
- Příloha F: Schéma zapojení přímých vstupů/výstupů MCU (tlačítka, indikační LED)
- Příloha G: Schéma zapojení výkonových komplementárních tranzistorů (UNI-PWR-OUT)
- Příloha H: Schéma zapojení univerzální vstupy, obvod RTC (DS1307+)
- Příloha I: Schéma zapojení převodníku FT232RL, senzoru diferenciálního tlaku, senzoru absolutního tlaku
- Příloha J: Schéma zapojení operačních zesilovačů ve funkci D/A převodníků
- Příloha K: Schéma zapojení vstupního napájení, spínaného zdroje LM2574M-5.0
- Příloha L: Motiv DPS strana TOP
- Příloha M: Motiv DPS strana BOTTOM
- Příloha N: Rozložení součástek a servisní potisk strana TOP
- Příloha O: Rozložení součástek a servisní potisk strana BOTTOM

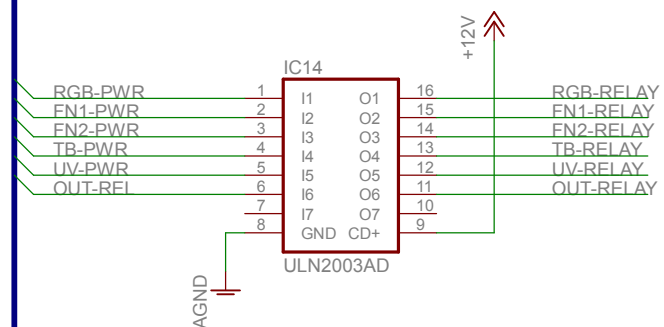
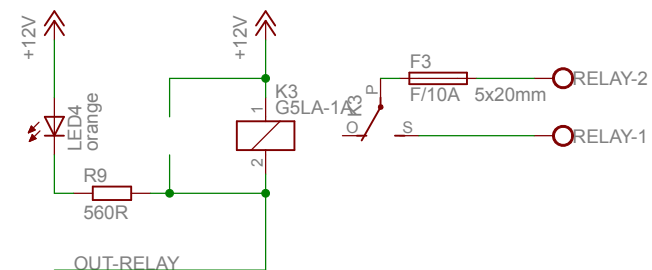
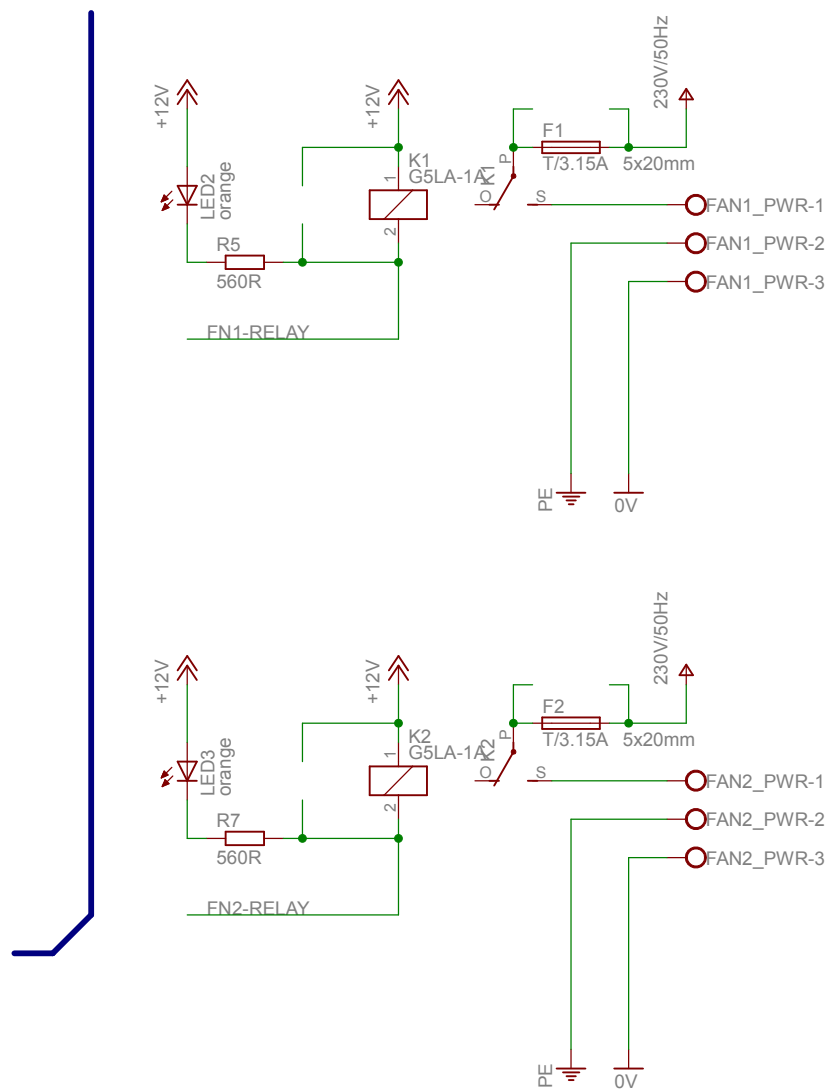


## Příloha A

BSC-BOX\_DPS\_1.6

28.5.2014 8:54:51

Sheet: 1/11

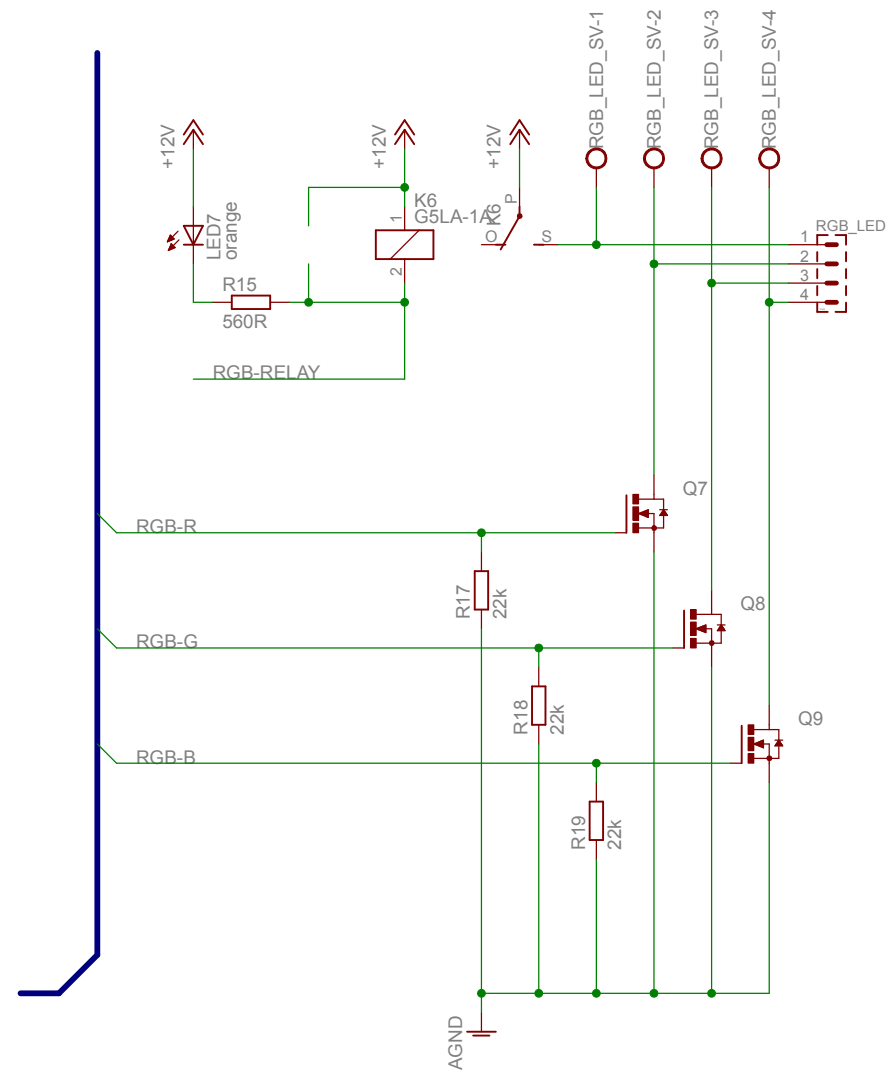
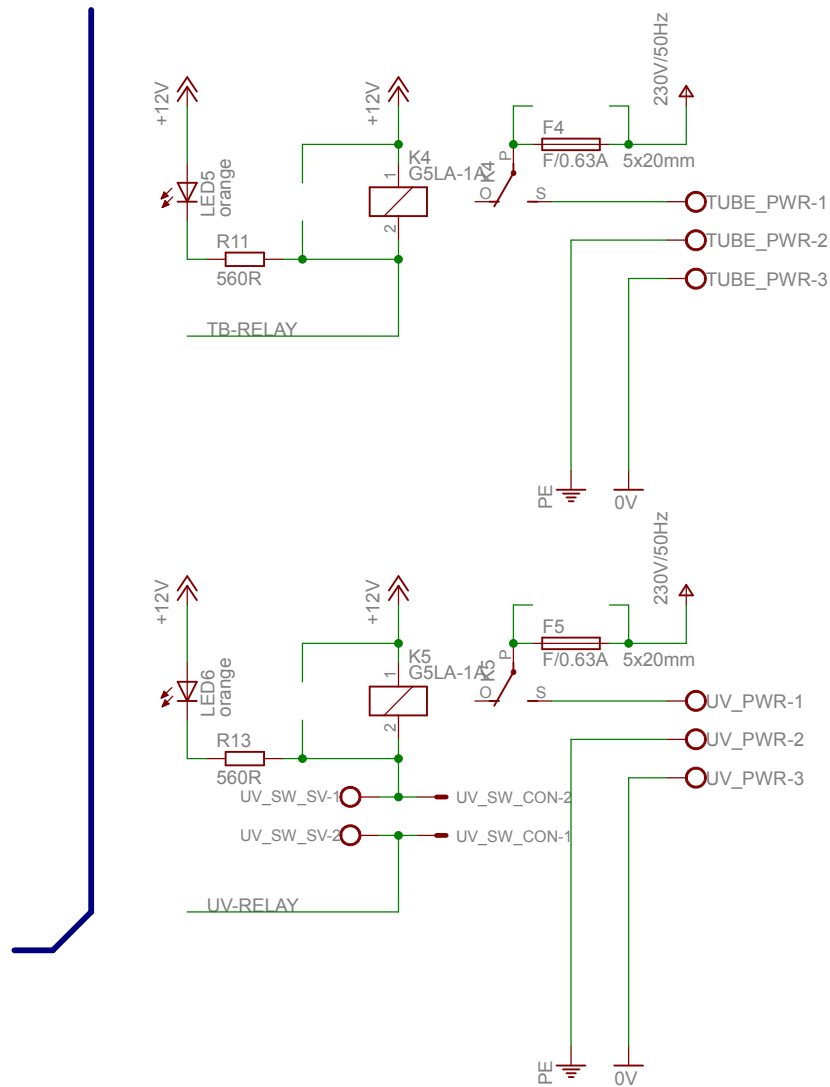


## Příloha B

BSC-BOX\_DPS\_1.6

28.5.2014 8:54:51

Sheet: 2/11

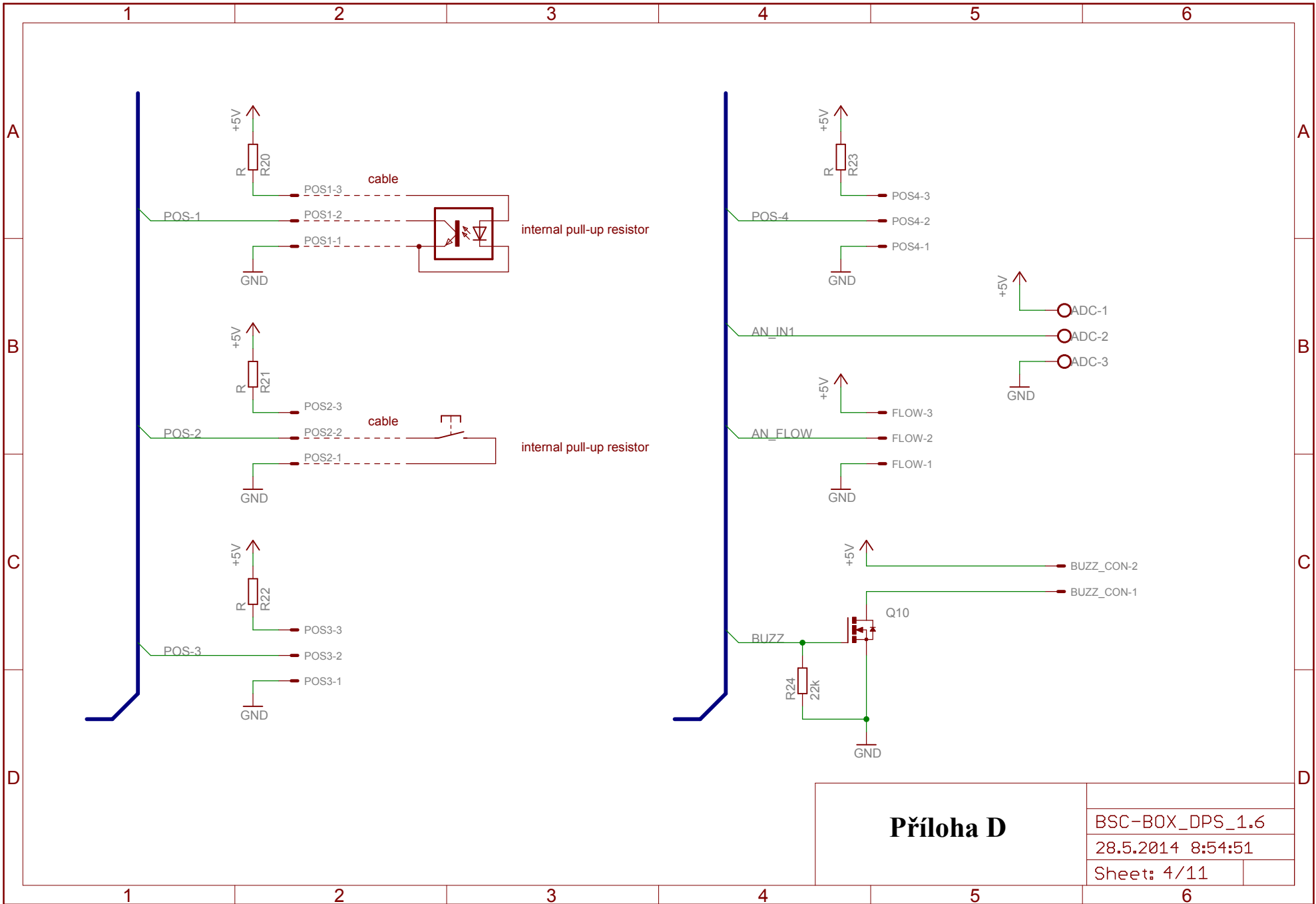


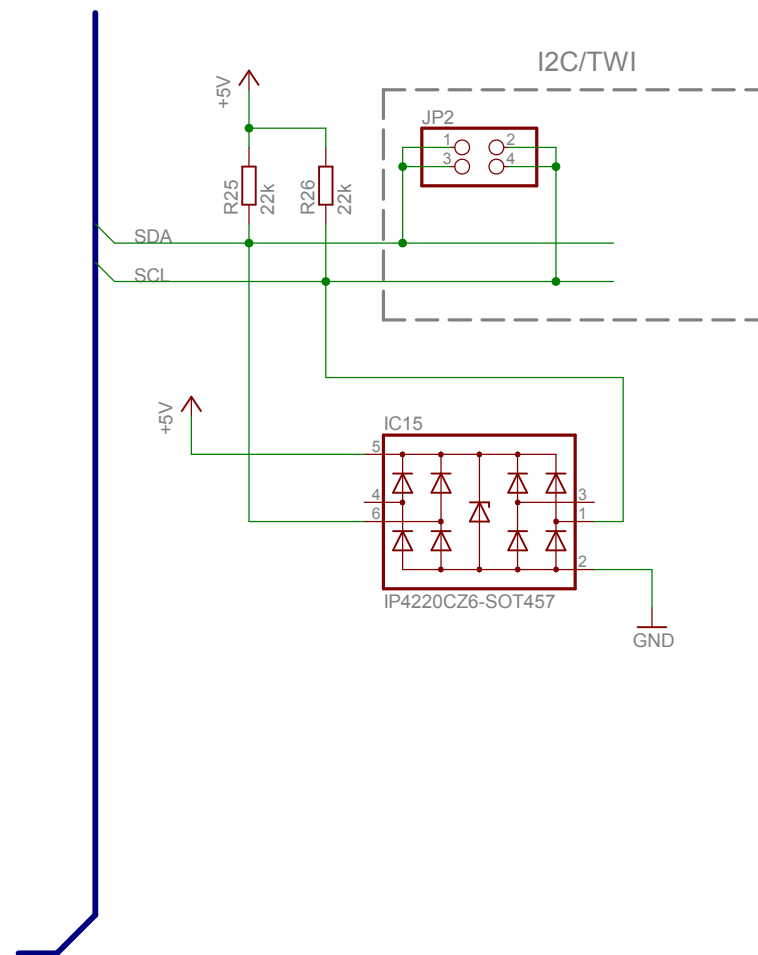
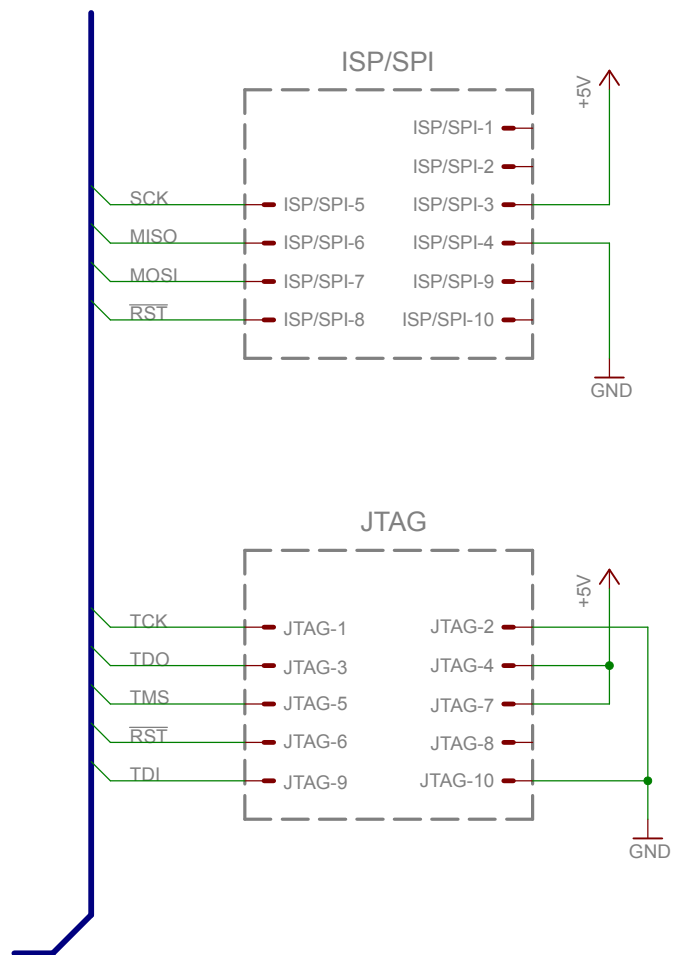
## Příloha C

BSC-BOX\_DPS\_1.6

28.5.2014 8:54:51

Sheet: 3/11



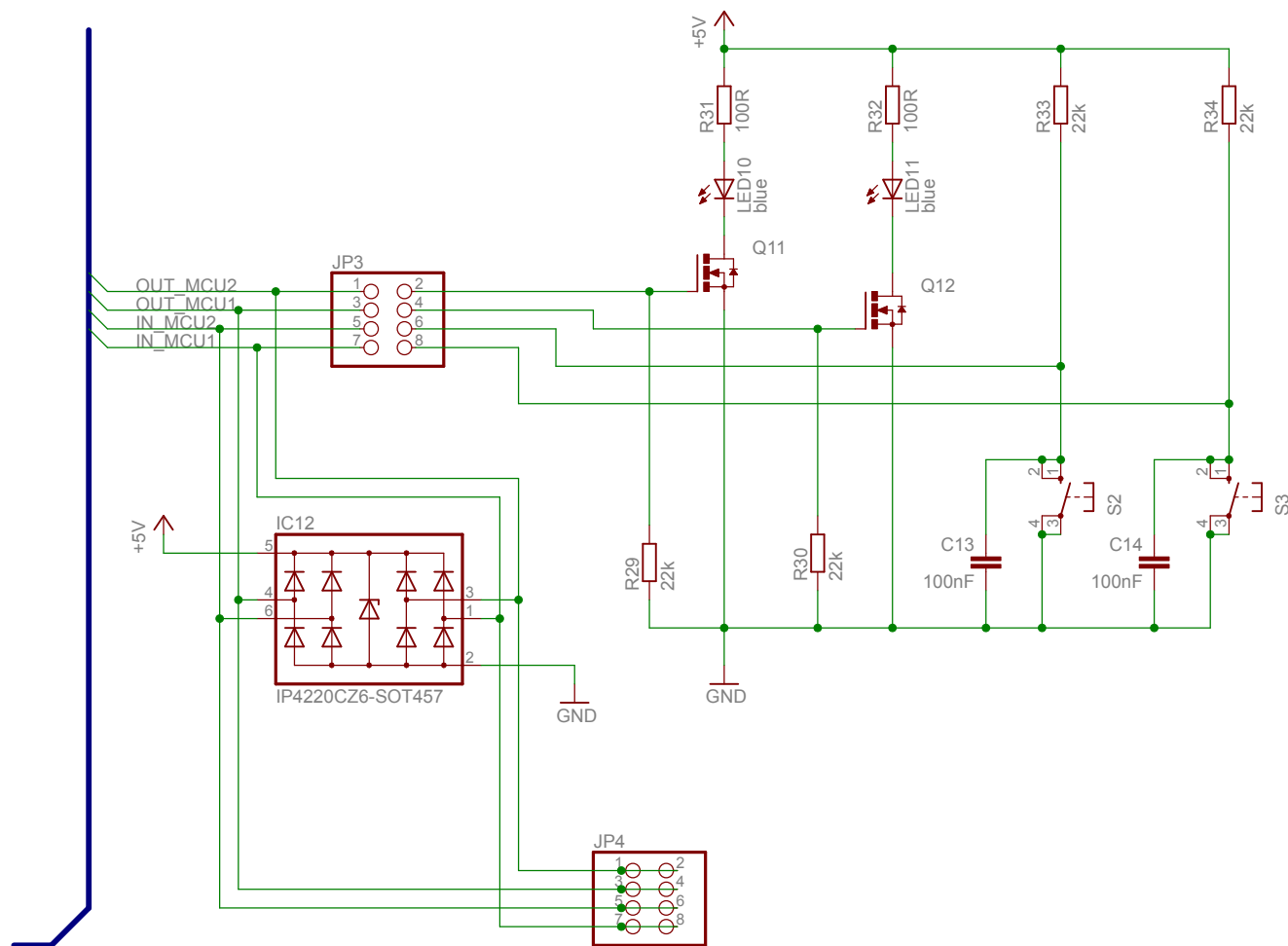


## Příloha E

BSC-BOX\_DPS\_1.6

28.5.2014 8:54:51

Sheet: 5/11



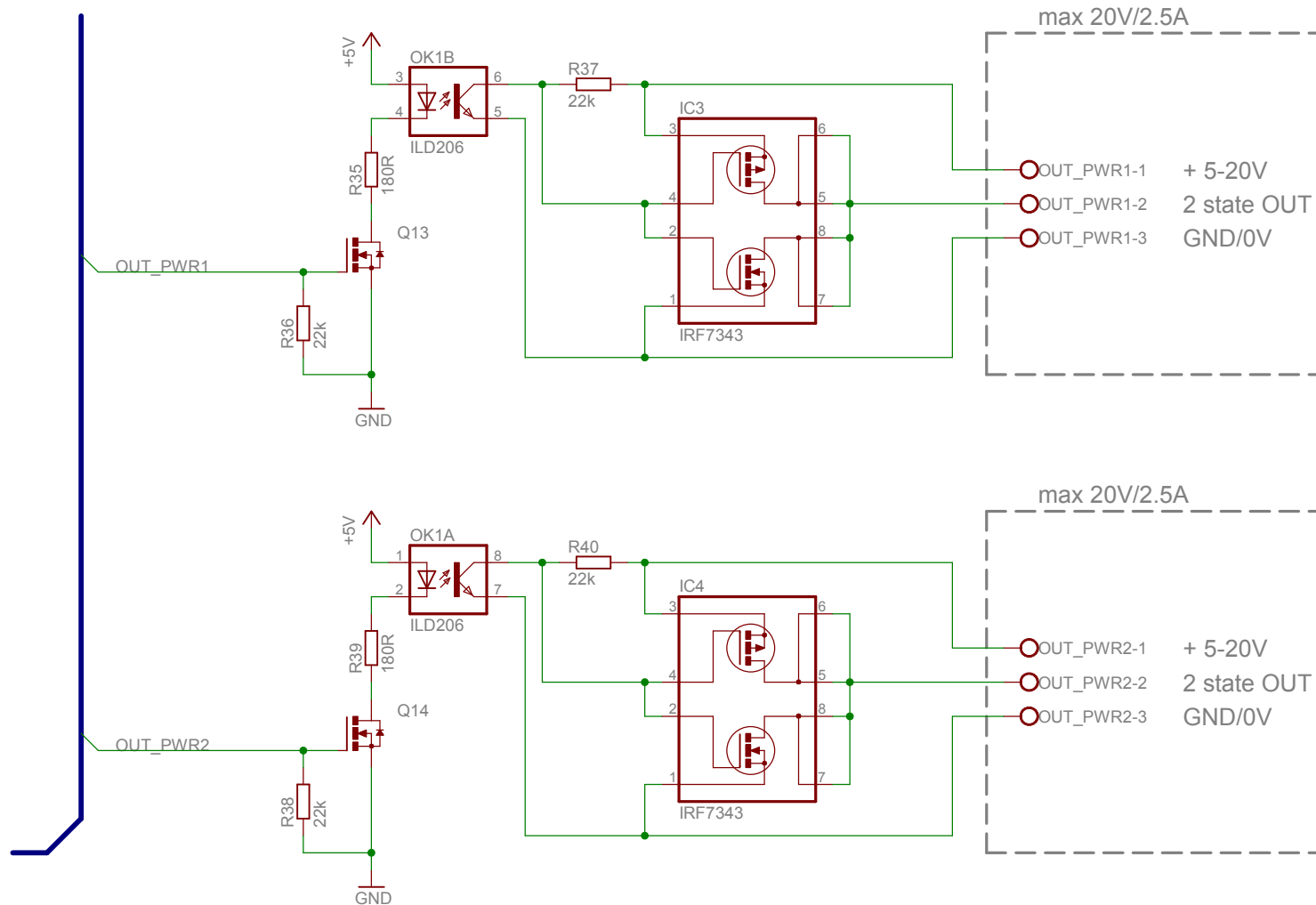
## Příloha F

BSC-BOX\_DPS\_1.6

28.5.2014 8:54:51

Sheet: 6/11



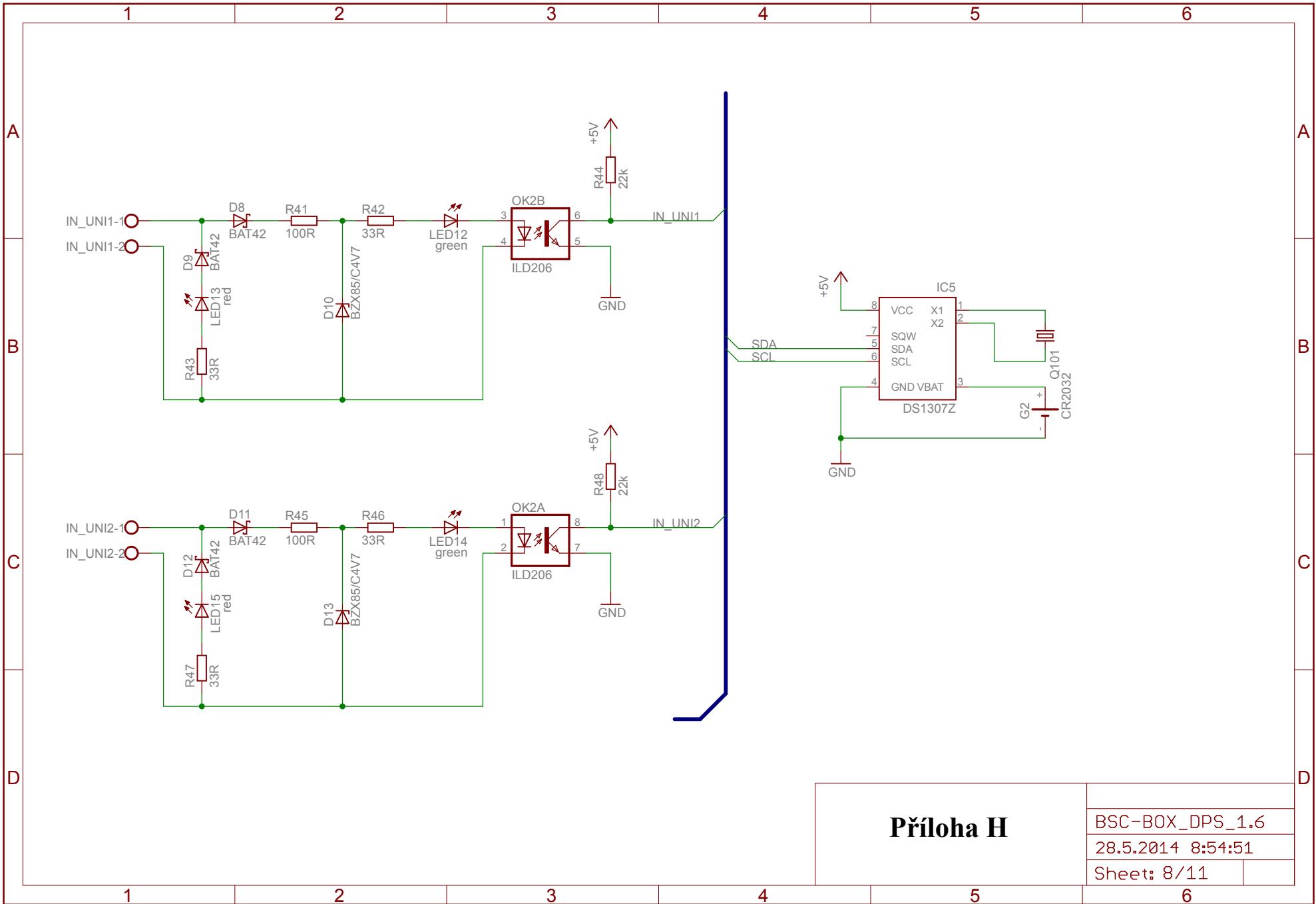


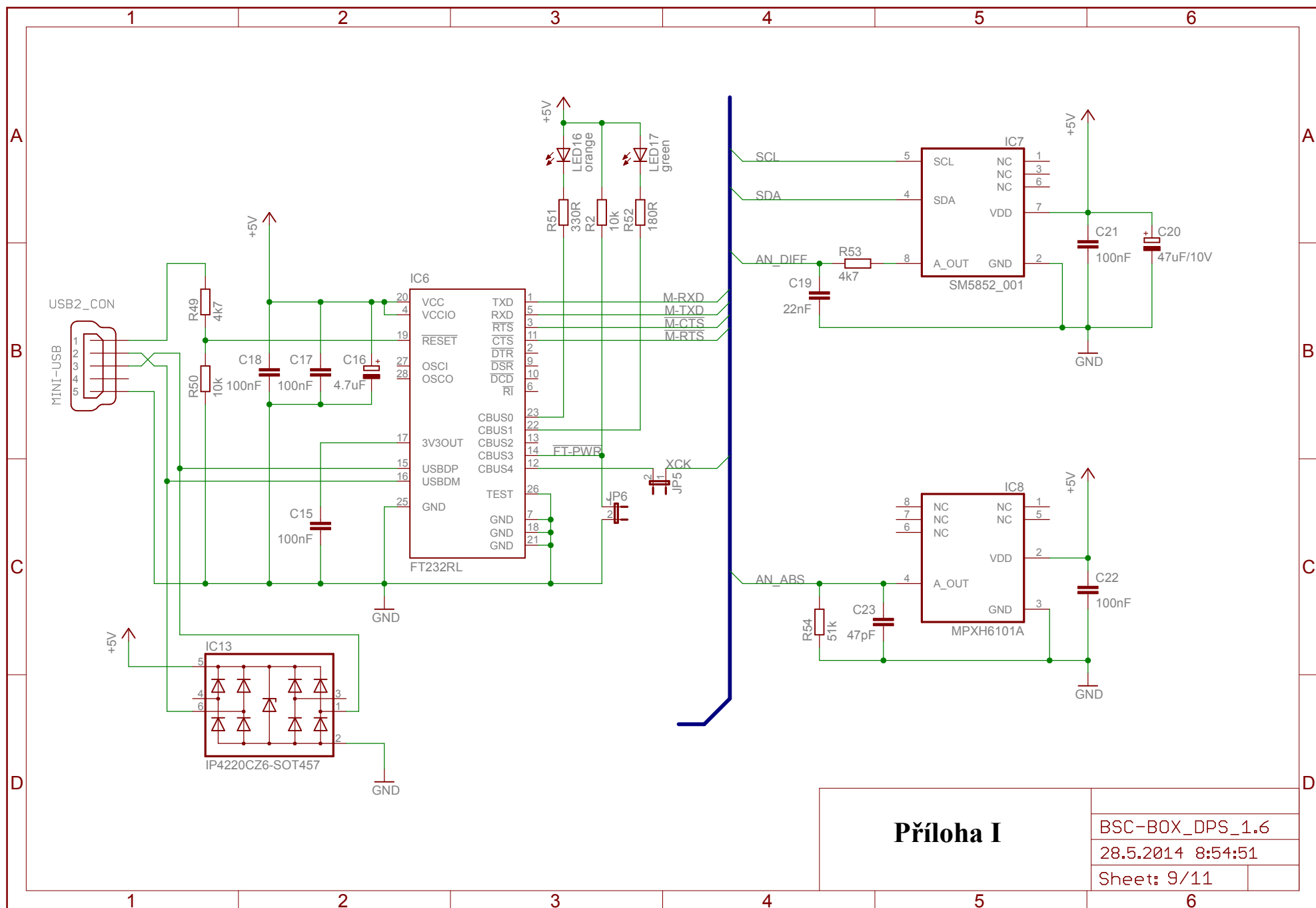
## Příloha G

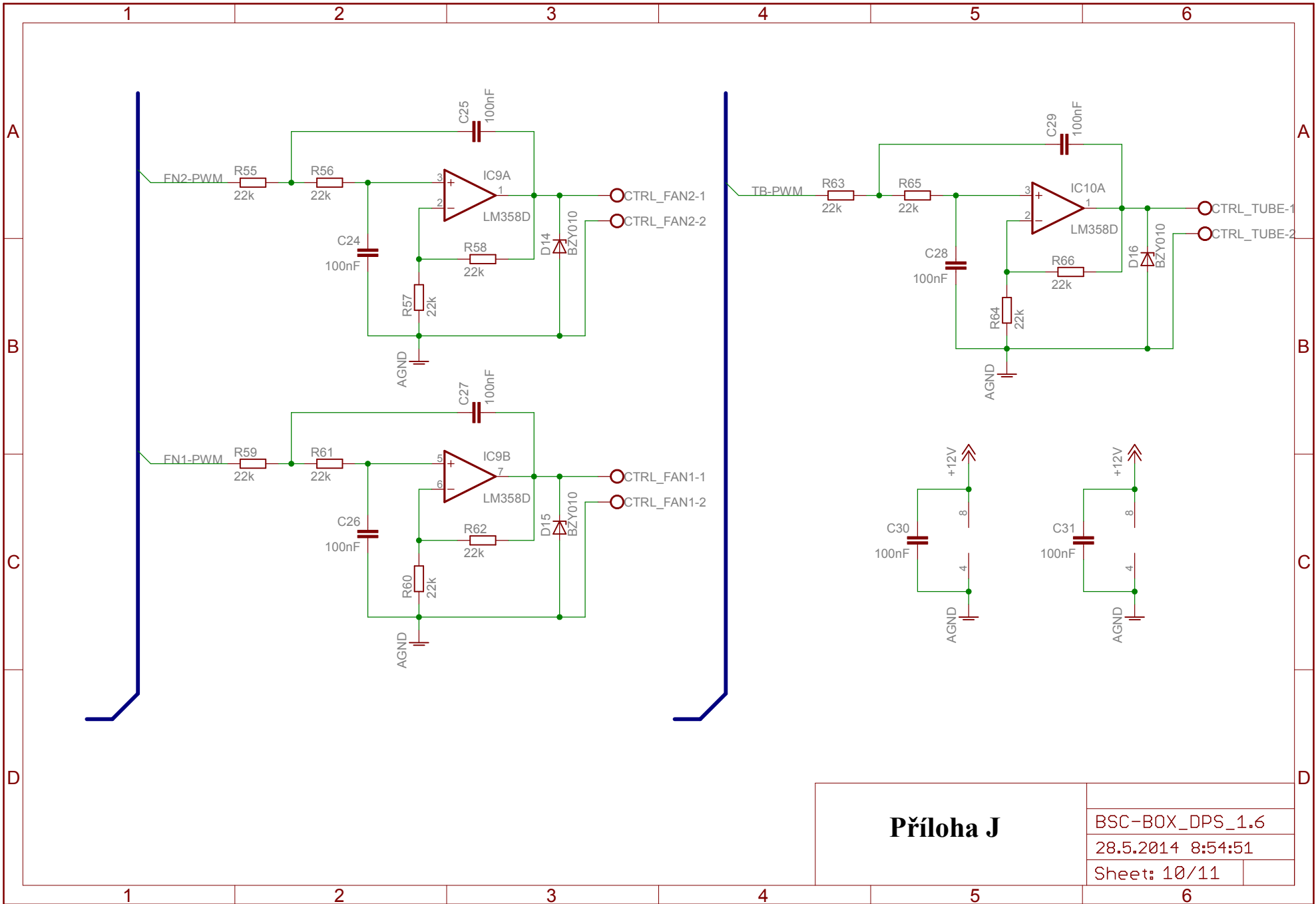
BSC-BOX\_DPS\_1.6

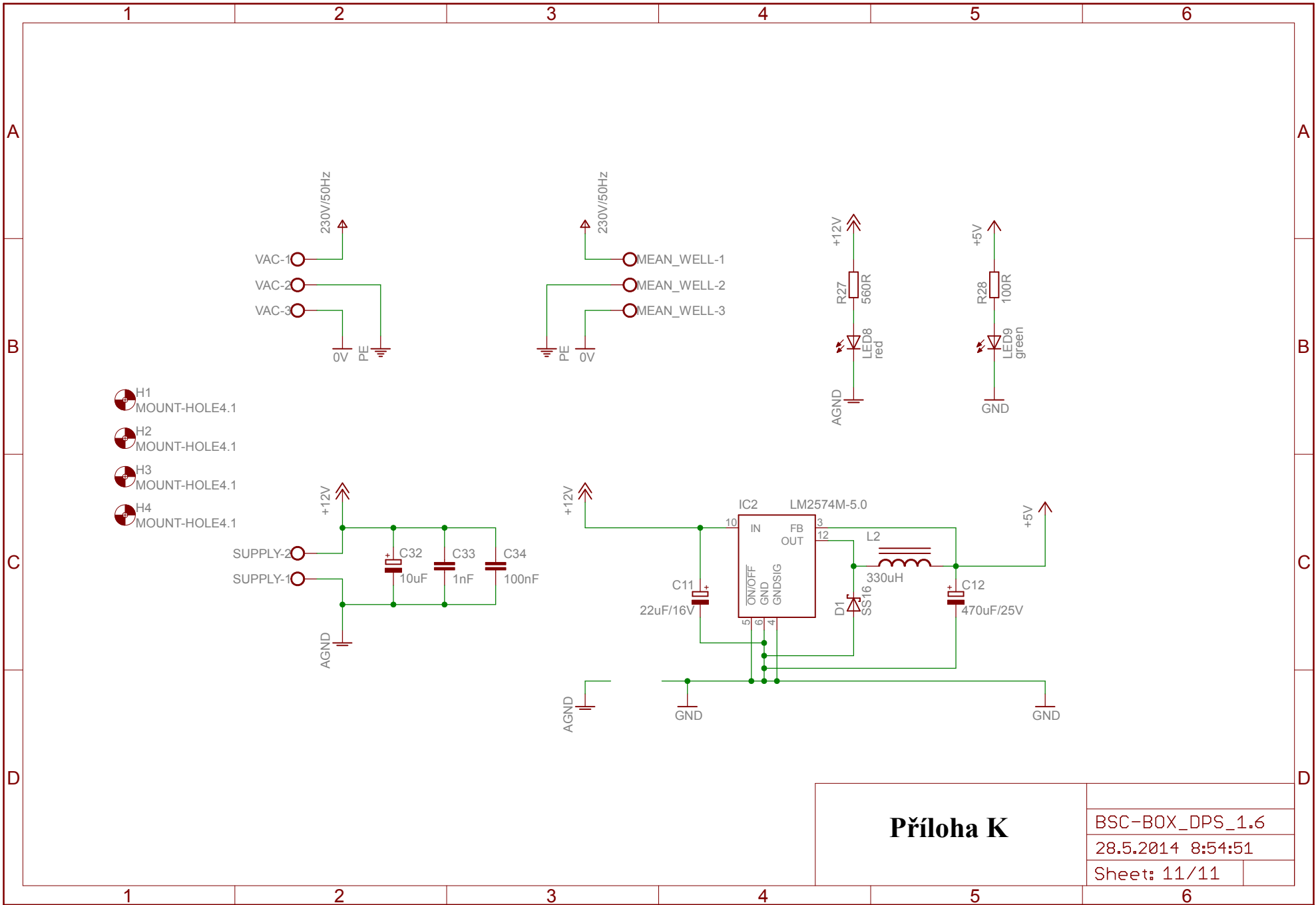
28.5.2014 8:54:51

Sheet: 7/11

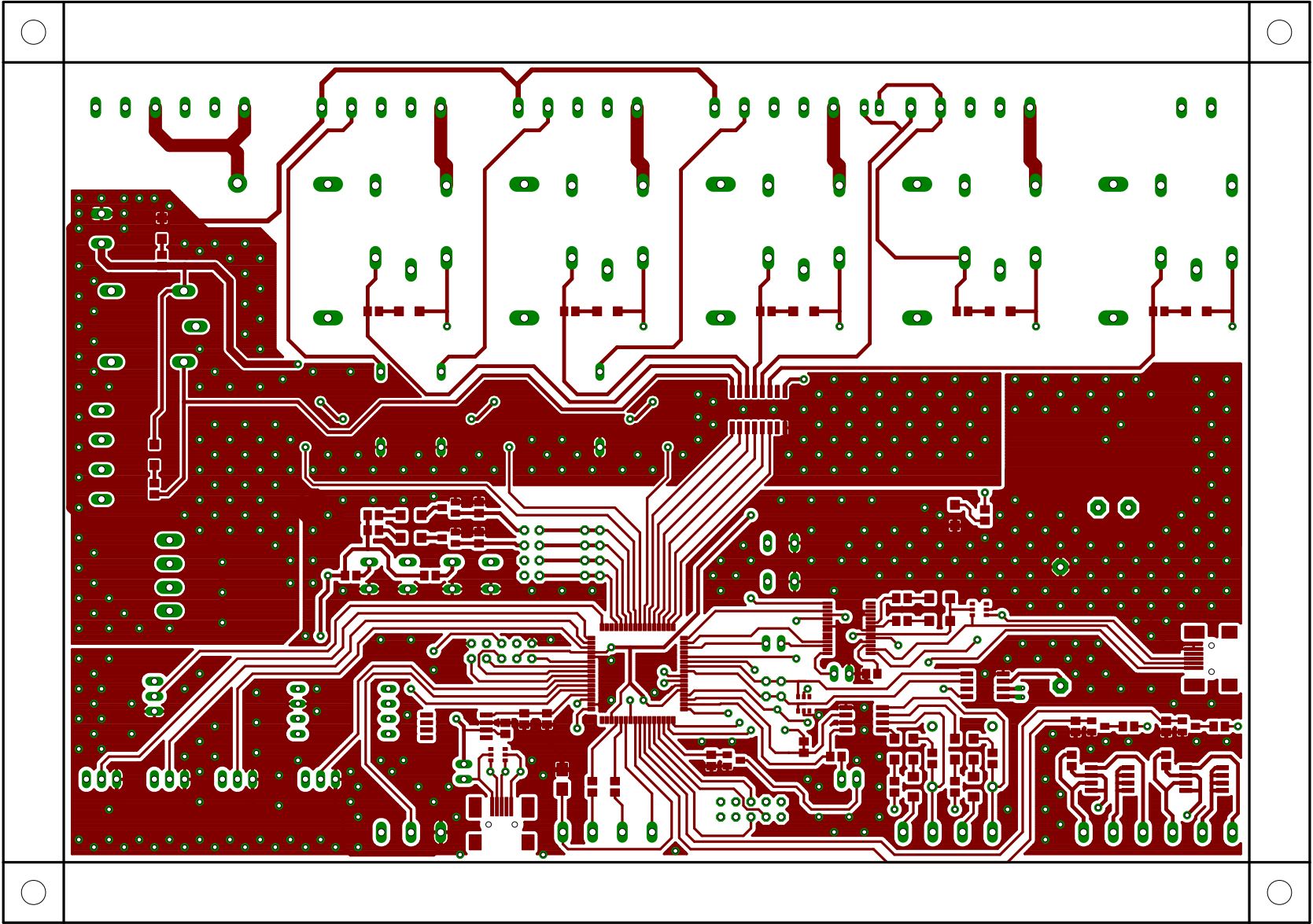




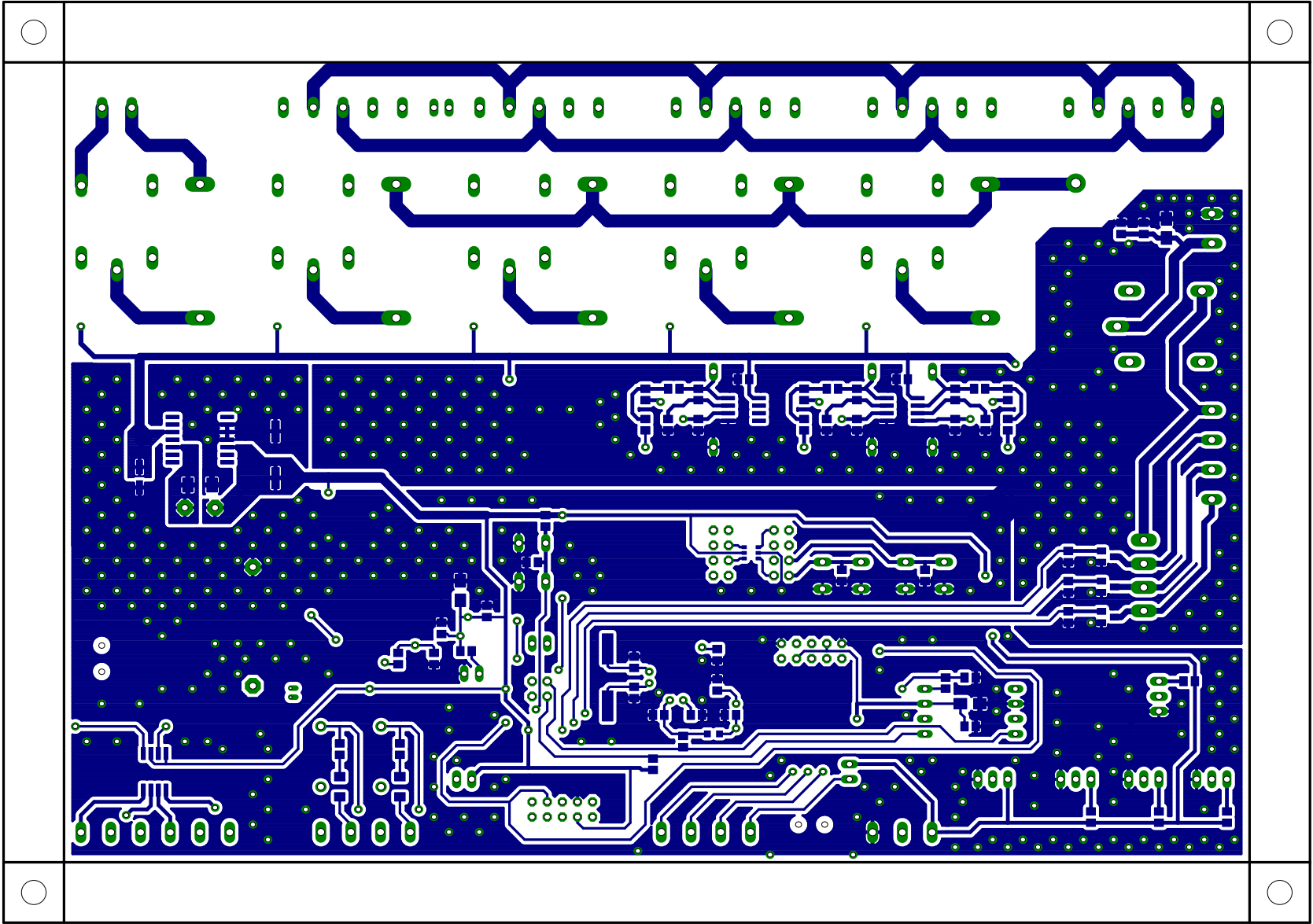




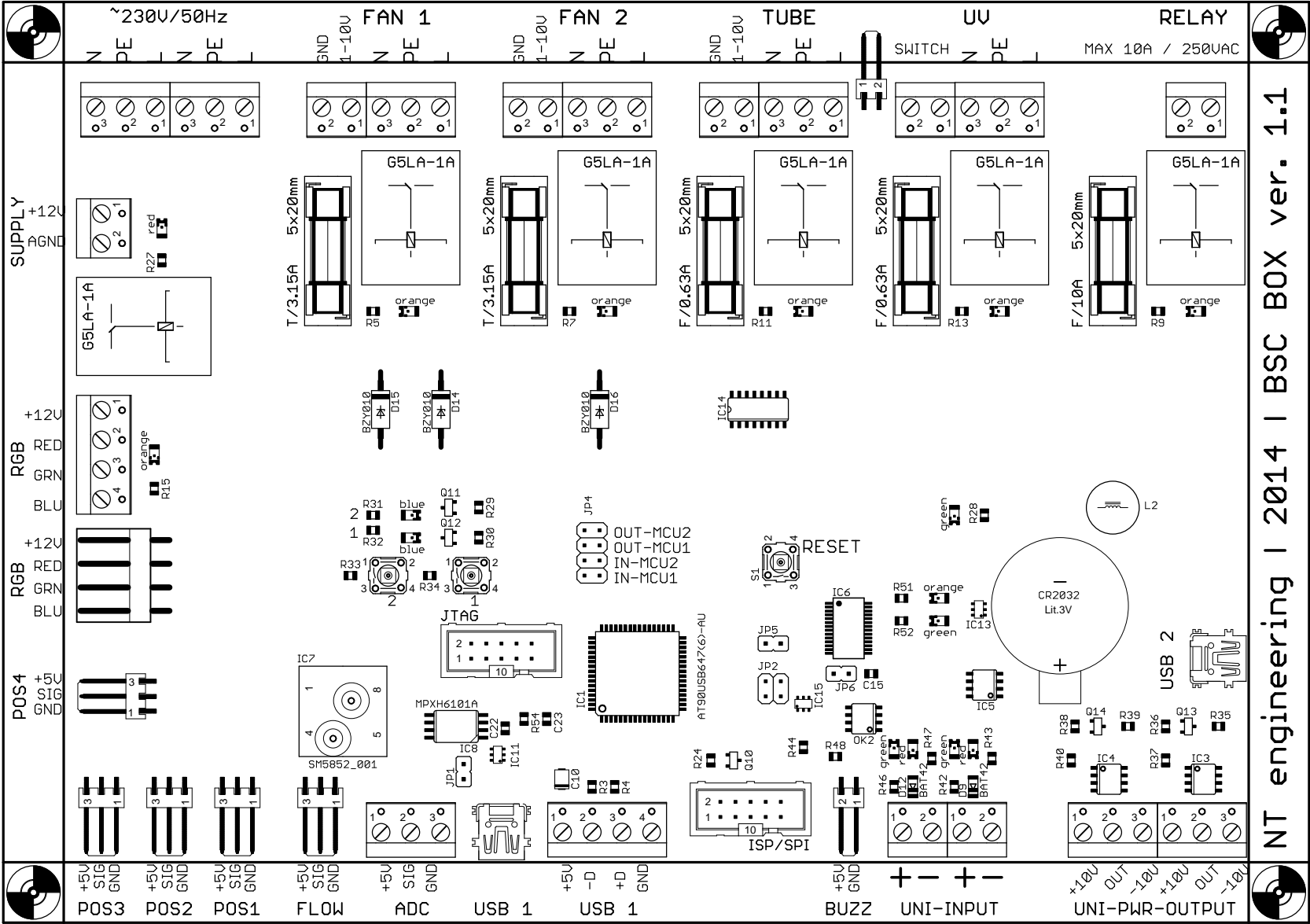
**Příloha L: Motiv DPS strana TOP**



**Příloha M: Motiv DPS strana BOTTOM**



Příloha N: Rozložení součástek a servisní potisk strana TOP





## Příloha O: Rozložení součástek a servisní potisk strana BOTTOM